

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

Mikko Kajava

KONEKOMMUTOIDUN TAHTIMOOTTORIKÄYTÖN
NUMEERINEN SIMULOINTI

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 26.1.1996

Työn valvoja

Professori Matti Mård

Työn ohjaaja

DI Mikko Koskela

TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

19921

Tekijä:	Mikko Kajava	
Työn nimi:	Konekommutoidun tahtimoottorikäytön numeerinen simulointi	
Päivämäärä	26.1.1996	Sivumäärä: 91
Osasto:	Sähkötekniikan osasto	
Professuuri:	S-81 Sähkökäyttö ja tehoelektroniikka	
Työn valvoja:	Professori Matti Mård	
Työn ohjaaja:	DI Mikko Koskela	

Tässä diplomityössä on tutkittu konekommutoitua tahtimoottorikäyttöä (LCI-käyttöä) laivan sähkökäyttönä ja kehitetty Saber-tietokoneohjelmistolla simulointimalli, jonka avulla käytön toimintaa on analysoitu.

Työn alkuosassa käsitellään LCI-käyttöä ja numeerista simulointia teoreettisesti. Koko käytön ja sen komponenttien toiminta sekä käytön ohjausmenetelmät esitellään. Työssä käytetyn simulointiohjelmiston toimintaa selvitetään lyhyesti. Työn loppuosassa esitellään työssä kehitetty simulointimalli ja sen avulla laskettuja tuloksia.

Simulointimallissa tahtimoottori on kuvattu kaksiakseliteorian mukaisilla yhtälöillä. Suuntaajan tyristoroiden mallina on käytetty aiemmin ABB Marinassa kehitettyä tyristorimallia, joka käsittelee tyristoria ohjattavana resistanssina. Mallinnettu säätöjärjestelmä on digitaalinen.

Mallin avulla on mahdollista simuloida kuusi- ja kaksitoistapulssisia LCI-käyttöjä. Eri käyttöjen simulointi on helppoa, koska kaikille käytön parametreille voidaan antaa haluttuja arvoja.

Simuloituja tuloksia on kuusipulssisen käytön osalta verrattu vastaavan todellisen käytön mittaustuloksiin. Simulointitulokset vastaavat mittaustuloksia hyvin. Kaksitoistapulssisen käytön osalta mittaustuloksia ei ole ollut käytettävissä, mutta simulointitulokset ovat teorian mukaisia.

Avainsanat:	konekommutoitu, LCI-käyttö, tahtimoottori, simulointi
--------------------	---

Author:	Mikko Kajava	
Name of the thesis:	Numerical simulation of the load commutated inverter fed synchronous motor drive	
Date:	26.1.1996	Number of pages: 91
Faculty:	Electrical engineering	
Professorship:	S-81 Electric Drives and Power Electronics	
Supervisor:	Professor Matti Mård	
Instructor:	MSc Mikko Koskela	
<p>In this master's thesis a load commutated inverter fed synchronous machine drive (LCI-drive) has been examined and a simulation model of the drive has been created with the Saber computer program. The operation of the drive has been analyzed with the help of the created model.</p> <p>In the beginning of the thesis LCI-drive and numerical simulation will be examined theoretically. The drive and its components as well as the control methods of the drive will be presented. The simulation program used in this thesis will be discussed shortly. In the end of the thesis the created model and the calculated results will be presented.</p> <p>The synchronous motor model is based on the equations of the two axis theory. The thyristor model used in the converter has been previously developed in the ABB Marine. In it the thyristor is modelled as a controllable resistance. The control system of the drive is digital.</p> <p>With the model it is possible to simulate six-pulse and twelve-pulse LCI-drives. Different drives can be easily simulated because all the parameters of the drive can be given any desired values.</p> <p>For the six-pulse drive simulated results have been compared with the measured results of a corresponding real drive. The results are very close to each other. For the twelve-pulse drive no measured results were available but the simulated results correspond to the theory well.</p>		
Keywords:	load commutated, LCI-drive, synchronous motor, simulation	

Alkulause

Tämä diplomityö on tehty ABB Industry oy:n Marine divisioonassa. Työn valvojana on toiminut professori Matti Mård, jolle kiitokset hänen työtäni kohtaan osoittamastaan mielenkiinnosta. DI Mikko Koskelaa kiitän toimimisesta työni ohjaajana ja lukuisista työn aikana käydyistä rakentavista keskusteluista. Kaupallisten ja teknisten tieteiden tukisäätiölle esitän kiitokseni saamastani taloudellisesta tuesta.

Kiitän myös DI Pekka Lepoa ja DI Juha Koukkaria heidän kanssaan työn aikana käymistäni keskusteluista. Haluan myös kiittää Marine divisioonan muita työntekijöitä viihtyisän ja haasteellisen työilmapiirin luomisesta.

Otaniemessä 26.1.1996

Mikko Kajava

Sisältö

Tiivistelmä	2
Abstract	3
Alkulause	4
Sisältö	6
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	7
1 Johdanto	11
2 LCI-käyttö	14
2.1 LCI-käytön rakenne	14
2.1.1 Käytön toiminnan lyhyt kuvaus	15
2.1.2 Erilaisia LCI-kytkentöjä	16
2.1.3 Kuusipulssisilta	18
2.1.4 Kolmivaiheinen tahtimoottori	19
2.1.5 2×3-vaiheinen tahtimoottori	23
2.1.6 Tahtimoottorin mitoitukselta	25
2.1.7 Välipiirikuristin	27
2.2 Säättö- ja ohjausmenetelmistä	29
2.2.1 Käytön säättöstruktuuuri	29
2.2.2 Toiminta nimellisnopeudella	30
2.2.3 Toiminta pienillä nopeuksilla	32
2.2.4 Vääntömomenttivärähtelyt	34
2.2.5 Kommutointivaran säätö	37
3 Simuloinnista	40
3.1 Simulointiohjelmisto	40
3.1.1 Simulointimallien luominen	41
3.1.2 Hierarkia	42
3.2 Transienttianalyysista	42
3.2.1 Transienttianalyysin erityispiirteitä Saberissa	43
3.2.2 Saberin numeerinen verkkoratkaisumenetelmä	44

3.2.3	Epälineaarisuudet Saberissa	45
4	LCI-käytön simulointimalli	47
4.1	Mallin rakenne	47
4.1.1	Suuntaajan malli	47
4.1.2	Moottorin malli	48
4.1.3	Generaattorit ja muuntajat	49
4.2	Säädön malli	50
4.2.1	Digitaalinen PID-säädin	50
4.2.2	Suodatukselta	50
4.2.3	Säätimien ulostulon rajoitus ja anti-wind-up	51
4.2.4	Vuon säätö	52
4.2.5	Välipiirivirran säätö	54
4.2.6	Myötäkytkentä moottorin pyörimisnopeudesta	54
4.2.7	Pyörimisnopeuden säätö	57
4.3	Tyristorien sytytyslogiikka	58
4.3.1	Magnetointisilta ja verkkosilta	58
4.3.2	Konesilta	58
5	Simulointituloksia ja tulosten arviointia	61
5.1	1 MW LCI-käytön simulointi- ja mittaustuloksia	62
5.1.1	Käytön päämitoitutusarvot ja parametrit	62
5.1.2	Ajo nimellismopeudella	63
5.1.3	Käynnistys nimellismopeuteen	72
5.2	21 MW LCI-käytön simulointituloksia	75
5.3	Simulointimallin jatkokehitysnäkymiä	81
6	Johtopäätökset	82
	Viitteet	84
	Liitteet	87
	LIITE A. Diskreetin PID-säätimen MAST-kielinen ohjelmakoodi	87
	LIITE B. 1 MW käytön simulointituloksia suunnanvaihdossa	90

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

C	kapasitanssi
d	pitkittäisakseli, parametri
e	Neperin luku, erosuure
f	funktio, taajuus
h	numeerisen integroinnin aika-askel
I	virta
I_{DC}	välipiirivirta
i	virta, kokonaisluku
$\sim i_{DC}$	välipiirivirran aaltisuus
i_k	kommutointivirta
i_s	tahtimoottorin staattorivirran kierto-osoitin
i'_s	tahtimoottorin staattorivirran kierto-osoitin tyristoriparin johtoajan lopussa
J	hitausmassa
j	kokonaisluku
j	imaginaariyksikkö
K_D	PID-säätimen D-osan kerroin
K_I	PID-säätimen I-osan kerroin
K_P	PID-säätimen P-osan kerroin
L	induktanssi
L_{DC}	välipiirikuristin
m	vaiheluku, painokerroin
n	painokerroin, kokonaisluku, pyörimisnopeus
N	käämikierrosluku
p	napapariluku
P	pätöteho
q	poikittaisakseli
R	resistanssi
s	integroitimuuttuja, Laplace-muuttuja, saha-aallon laskevan osan funktio
S	näennäisteho
t	aika
t_m	marginaaliaika
T	vääntömomentti
\bar{T}	keskimääräinen vääntömomentti
T_m	tahtimoottorin mekaaninen vääntömomentti
T_w	sähkökäytön vastamomentti
u	jännite, säätimen ulostulo
$\sim u$	kuusipulssisillan lähtöjännitteen aaltisuus
$\sim u_{diI}$	verkkosillan tasajännitteen aaltisuus

$\sim u_{\text{diII}}$	konesillan tasajännitteen aaltoisuus
u_{di}	kuusipulssisillan lähtöjännitteen hetkellisarvo
$u_{\text{di}\alpha}$	kuusipulssisillan lähtöjännitteen keskiarvo sytytyskulman arvolla α
u_{ero}	konesillan tasajännitepuolen jännitteen hetkellisarvon ja keskiarvon erotus
u_{δ}	tahtimoottorin liikejännite
u_{ψ}	vuosäätimen ulostulo
U_{d}	kuusipulssisillan tasajännitteen tasakomponentti
U_{n}	tahtimoottorin nimellinen pääjännite
U_{N}	syöttöverkon nimellinen pääjännite
U_{p}	pääjännite
u_{raj}	PID-säätimen rajoitettu ulostulo
u_{vasta}	nopeussäätimen myötäkytkentäsignaali
u_{ref}	kuusipulssisillan sytytyskulman määräävä referenssijännite
V	tyristori
\hat{w}_{iI}	verkkosillan aaltoisuuskertoimen huippuarvo
\hat{w}_{iII}	konesillan aaltoisuuskertoimen huippuarvo
\hat{w}_{iz}	koko suuntaajan aaltoisuuskertoimen huippuarvo
x	muuttuja, reaktanssi, akseli
x_{zt}	LCI-käytön pääpiiriä kuvaava suhteellinen reaktanssi
y	funktio, akseli
α	staattoriin sidotun koordinaatiston akseli, sytytyskulma
α_{I}	verkkosillan sytytyskulma
α_{II}	konesillan sytytyskulma
α_{III}	magnetointisillan sytytyskulma
β	staattoriin sidotun koordinaatiston akseli, redusoitu sytytyskulma
γ	kentänheikennyspiste, kommutointivara
δ	tahtimoottorin napakulma
φ	jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma
ξ_{s}	käämityskerroin
μ	kommutointikulma
ω_{m}	moottorin sähköinen kulmanopeus
Ω_{m}	moottorin mekaaninen kulmanopeus
ω_{n}	moottorin nimellinen sähkökulmanopeus
ω_{N}	syöttöverkon nimellinen kulmataajuus
Ψ	vujo
Ψ_{s}	tahtimoottorin staattorivuon kierto-osoitin
Ψ_{δ}	tahtimoottorin ilmajälivuon kierto-osoitin
ψ_{δ}	tahtimoottorin ilmajälivuon suhteellisarvo
τ	suodatusaikavakio, integrointimuuttuja

θ_1, θ_2	ensimmäisen asteen diskreetissä suodatuksessa käytettäviä vakioita
ϑ	pyörähdyskulma

Alaindeksit, ellei muuta ole ilmoitettu

0	ajan hetkellä nolla, nolla-
1	2×3-vaiheinen tahtimoottorin staattorin 1. kolmivaihejärjestelmän
2	2×3-vaiheinen tahtimoottorin staattorin 2. kolmivaihejärjestelmän
I	verrkosillan
II	konesillan
a	a-vaiheen
b	b-vaiheen
c	c-vaiheen
D	vaimennuskäämin pitkittäinen
d	pitkittäinen
eff	tehollisarvo
f	napakäämin
filt	suodatettu
k	kommutointi-, väli-
k	kokonaisluku
m	magnetointi
max	suurin
mek	mekaaninen
min	pienin
mit	mitattu
N	syöttöverkon nimellinen
n	tahtimoottorin nimellinen
Q	vaimennuskäämin poikittainen
q	poikittainen
r	r-vaiheen, roottorin
s	s-vaiheen, staattorin
sim	simuloitu
t	t-vaiheen
δ	ilmaväli-
σ	haja-

Yläindeksit, ellei muuta ole ilmoitettu

*	ohje
'	derivaatta, redusoitu, muutos-

"	alku-
~	aaltoisuus, esimerkiksi virran aaltoisuus $\sim i$

Lyhenteet

L_1	1-normi
LCI	kuormakommutoitu vaihtosuuntaaja (engl. load commutated inverter)
LTE	paikallinen pyöristysvirhe (engl. local truncation error)
THD	harmoninen kokonaissärö

Luku 1

Johdanto

Uusien laivojen voimansiirtojärjestelmäksi valitaan useimmiten perinteinen mekaaninen järjestelmä. Risteilyaluksiin ja erikoisaluksiin, kuten jäänmurtajiin, kaapelinlaskulaivoihin ja sukkulatankkereihin, rakennetaan kuitenkin nykyisin mekaanisen sijasta usein dieselsähköinen järjestelmä. Siinä dieselöljyn sisältämä primäärienergia muutetaan dieselmoottoreilla mekaaniseksi energiaksi ja siitä edelleen generaattoreilla sähköiseksi energiaksi. Suuntaajien avulla sähköinen energia syötetään sopivassa muodossa moottoreille, jotka muuttavat sen potkurin mekaaniseksi pyörimisliikkeeksi.

Tässä diplomityössä on tutkittu konekommutoitua tahtimoottorikäyttöä eli LCI-käyttöä laivan potkurikäyttönä ja rakennettu käytön toimintaa simuloiva malli Saber tietokoneohjelmistolla, jolla myös muutamia tyypillisiä laivakäyttöjen tilanteita on simuloitu. Työn tavoitteena oli käytön teoreettisen analysoinnin ja toimivan simulointimallin kehittämisen lisäksi mallin avulla laskettujen tulosten arviointi erityisesti laivan sähköjärjestelmän toimittajan näkökulmasta.

Konekommutoitua tahtimoottorikäyttöä kutsutaan myös kuormakommutoiduksi tahtimoottorikäytöksi ja joskus kommutaattorittomaksi tasavirtakoneeksi. Käyttö muistuttaa toiminnaltaan tasavirtakonekäyttöä, vaikka ankkurikäämitys on perinteisestä tasavirtakoneesta poiketen koneen staattorissa ja magnetointikäämitys roottorissa. Vieraskielisyydestään huolimatta käytön yleisimmäksi nimitykseksi on vakiintunut LCI-tahtimoottorikäyttö. LCI on lyhenne englannin kielen sanoista *load commutated inverter*. Tässä diplomityössä koko käytöstä käytetään nimitystä LCI-käyttö ja pelkkää suuntaajaa kutsutaan suuntaajaksi tai joissakin yhteyksissä selvyden takia konekommutoiduksi suuntaajaksi.

Konekommutoitu suuntaaja on muuttuvanopeuksisten tahtimoottorikäyttöjen syöttösuuntaaja. Se soveltuu parhaiten käyttöihin, joilta vaaditaan hyvin suurta

tehoa tai pyörimisnopeutta tai molempia yhtä aikaa. Ensimmäiset LCI-käyttöjen sovellukset olivat suuritehoisia pumppuvoimalaitosten käynnistyskäyttöjä [1]. Niissä tahtikoneet käynnistetään suuntaajan avulla sähköverkon taajuutta vastaavaan pyörimisnopeuteen ja tämän jälkeen koneet kytketään suoraan verkkoon ja suuntaaja kytketään irti. Sittemmin LCI-käytöt ovat levinneet myös muihin suuritehoisiin säädettävää pyörimisnopeutta vaativiin käyttöihin.

LCI-käytön ongelmia ovat epätasainen vääntömomentti ja huono tehokerroin pienillä nopeuksilla. Jos suuntaajan lähtötaajuuden ei tarvitse olla kovin suuri, kuten on asianlaita potkurikäytöissä, LCI-käytön sijasta voidaan rakentaa syklokonvertteri-tahtimoottorikäyttö, jonka toiminta on ongelmaton myös pienillä nopeuksilla. Mikäli käytön on kyettävä toimimaan jatkuvasti pienillä nopeuksilla ja samanaikaisesti käytöltä vaaditaan suurta momenttia, voi LCI-käyttö olla kokonaan poissuljettu ja ainoaksi vaihtoehdoksi tahtimoottorin syöttölaitteeksi jää suuritehoisissa käytöissä nykyisin syklokonvertteri. Esimerkkinä tällaisesta käytöstä mainittakoon jäänmurtaajan dieselsähköinen potkurikäyttö. Tulevaisuudessa konekommutoidun suuntaajan ja syklokonvertterin vaihtoehtona voitaneen rakentaa myös suuritehoisiin käyttöihin jännitevälipiirisuuntaaja.

Simuloinnista on tietokoneiden kehityksen myötä tullut yhä merkittävämpi osa teknistä suunnitteluprosessia. Myös tutkimustoiminta käyttää paljon simuloinnin tarjoamia etuja hyväkseen. Simuloinnin avulla voidaan suunniteltavasta kohteesta saada sellaista informaatiota, jonka saaminen muilla keinoin olisi hyvin hankalaa ja kallista. Joissakin sovelluksissa, kuten esimerkiksi tuontantojärjestelmien pitkän aikavälin toiminnan suunnittelussa, simuloinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä aikasäästöjä mallin toimiessa reaalista järjestelmää huomattavasti nopeammin. Sähkökäytöissä tilanne on vielä nykyisillä tietokonetehoilla yleensä päinvastainen. Sen sijaan turvallisuustekijät ovat sähkökäytöissä usein simuloinnin merkittävä etu. Esimerkiksi monia käytölle tyypillisiä parametreja voidaan suhteellisen huolettomasti vaihdella, ilman että on vaaraa laitteiston rikkoutumisesta, ja näin simulointi voi olla yksi apuväline sähkökäytön mitoituksessa.

Sähkökäyttöjen analysoinnissa simuloinnin etuna verrattuna teoreettiseen tarkasteluun on, että kaikkien parametrien vaikutus käytön toimintaan voidaan helpommin ottaa huomioon. Esimerkiksi säätimien tyypillisten viritysparametrien sisällyttäminen teoreettiseen analyysiin tekee analyysistä hyvin raskaan ja käytännössä teorioissa voidaan keskittyä kerralla vain rajattuihin osa-alueisiin käytöstä. Teoreettisesti johdetut analyttiset tulokset antavat kuitenkin järjestelmän käyttäytymisestä arvokasta tietoa, jota ilman simuloimalla saatavien tulosten selittäminen voi olla mahdotonta. Näin simulointi tulee nähdä pikemminkin teorioiden kehittämistä tukevana tutkimuksena kuin erottaa nämä tutkimusalueet toisistaan.

Diplomityö jakautuu kahteen pääosaan. Ensimmäisessä, joka kattaa luvut 2 ja 3, on tarkasteltu LCI-käyttöä ja simulointia teoreettisesti. Luvussa 2 käsitellään LCI-käyttöä. Aluksi selvitetään käytön toimintaa ja rakennetta yleisesti ja lopuksi käytön ohjausmenetelmiä. Luvussa 3 käsitellään käytettyä simulointiohjelmistoa, tietokonesimulointia yleisesti ja simuloinnin numeriikkaa.

Toisessa, luvut 4–6 käsittävässä osassa, käsittely on käytännönläheisempää. Luvussa 4 esitellään työssä kehitetty LCI-käytön simulointimalli. Luvussa 5 analysoidaan simulointimallin avulla laskettuja tyypillisiä laivakäyttöjen tilanteita ja luodaan katsaus simulointimallin jatkokehitysmahdollisuuksiin. Lopuksi luvussa 6 pohditaan työn tuloksia.

Luku 2

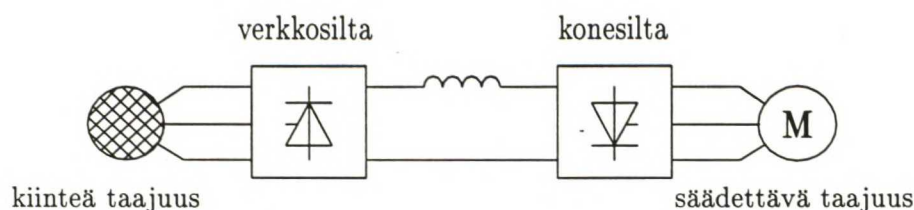
LCI-käyttö

Tässä luvussa analysoidaan LCI-käytön rakennetta ja toimintaa teoreettisesti. Kappaleessa 2.1 selvitetään aluksi koko käytön rakenne ja toiminta lyhyesti. Kappaleen loppupuolella on tutkittu käytön komponenttien rakennetta, toimintaa ja mitoitus-

Kappaleessa 2.2 analysoidaan käytön toimintaa tarkemmin esittelemällä käytön säätö- ja ohjausmenetelmät. Kappaleessa on myös tutkittu LCI-käytön erityisongelmaa, vääntömomenttivärähtelyitä, teoreettisesti.

2.1 LCI-käytön rakenne

LCI-käytön pääosat ovat konekommutoitu taajuudenmuuttaja ja tahtimoottori sekä näiden tarkoituksenmukaisesta yhteistoiminnasta huolehtivat säätö- ja ohjauspiirit. Käytön periaatekaavio on esitetty kuvassa 2.1. Kuvassa taajuudenmuuttaja on lisäksi jaoteltu pääosiinsa, joita ovat kaksi kuusipulssisiltaa ja välipiirikuristin. Taajuudenmuuttajan sillat on koottu tyristoreista ja ne on liitetty toisiinsa kuvan 2.1 osoittamalla tavalla. Siltojen väliin kytketyn kuristimen tarkoituksena on tasoittaa välipiirin virtaa riittävästi.



Kuva 2.1. LCI-käytön periaatekaavio

Käytön normaalilla toiminta-alueella, moottorikäytössä, syöttöverkon puoleinen kuusipulssisilta toimii tasasuuntaajana ja tahtimoottorin puoleinen silta vaihtosuuntaajana. Koska siltojen toiminta-alueet voivat muissa ajotilanteissa, kuten verkkoonjarrutuksessa, olla vaihtuneet, ei ole mielekäästä puhua tasa- ja vaihtosuuntaussilloista, vaan tässä diplomityössä käytetään syöttöverkon puoleisesta sillasta nimitystä verkkosilta ja moottorin puoleisesta sillasta nimitystä konesilta.

Syöttöverkko on normaali kolmivaiheinen voimansiirtoverkko. Laivoissa verkon oikosulkuteho suhteessa käytön tehoon on valtakunnan siirtoverkkoa pienempi, mikä merkitsee mm. huonompaa jännitejäykkyyttä ja pienempiä oikosulkuvirtoja. Syöttöverkon jännite ja taajuus pyritään pitämään vakioina.

Käytön moottori on tavallinen monivaiheinen vaimennuskäämityksellä varustettu tahtimoottori. Toiminnan periaatteen kannalta kolmivaiheisen moottorin käsittely on riittävää, mutta käytännössä moottorit rakennetaan yleensä 2×3 -vaiheisiksi, jolloin moottorin staattorissa on kaksi toisistaan erotettua 30 asteen vaihesiirrossa olevaa käämitystä. Tällöin käyttö saadaan toimintavarmemmaksi ja muutenkin mekaanisilta ja sähköisiltä ominaisuuksiltaan kolmivaiheista paremmaksi. Laivakäytöissä moottori voidaan rakentaa pienten pyörimisnopeuksien takia avonapaiseksi. Vaadittaessa suuria pyörimisnopeuksia moottori rakennetaan umpinapaiseksi mekaanisista syistä, mutta käytön toimintaperiaatteen kannalta asialla ei ole merkitystä.

Moottorin akselille on kytketty nopeus- ja asentoanturit mittaamaan koneen pyörimisnopeutta ja akselin kiertymäkulmaa. Niitä, kuten myöskään käytön säätö- ja ohjauspiirejä, ei ole piirretty kuvaan 2.1 näkyviin.

Mikäli moottorina käytetään 2×3 -vaiheista moottoria, konesillan tulee olla 12-pulssinen. Verkkovaikutusten takia verkkosiltakin rakennetaan tällöin 12-pulssiseksi, mutta käytön toiminnan kannalta tämä ei ole välttämätöntä. 12-pulssinen kytkentä toteutetaan kuusipulssisia siltoja peruskomponentteina käyttäen kuvien 2.2 ja 2.3 mukaisesti. Käyttöä syötetään kolmikäämimuuntajalla, jonka kahden kolmivaiheisen toisiokäämityksen välillä on 30 asteen vaihesiirto, jolloin voidaan puhua 2×3 -vaiheisesta syötöstä.

2.1.1 Käytön toiminnan lyhyt kuvaus

LCI-käytössä kiinteätaajuiseen vaihtosähköverkkoon on kytketty kuvan 2.1 mukaisesti ensin tasasuuntaaja, joka syöttää tasavirtaa välipiirikuristimeen. Koneilta ohjaa kuristimen virran moottorin vaiheille.

Normaalilla luonnollisen kommutoinnin toiminta-alueella kuusipulssisiltojen ylä- ja alapuolisissa vaihtokytkimissä on kummassakin aina vähintään yhden tyristorin johdettava. Ideaalisessa käytössä vaihtokytkimissä johtaa täsmälleen yksi tyristori kummassakin, mutta käytännössä kommutoinnin aikana johtavia tyristoreita on kommutoivassa vaihtokytkimessä kaksi kappaletta eli siis yhteensä kolme johtavaa tyristoria koko sillassa.

Verkkosillan sytytyspulssit on tahdistettu syöttöverkon taajuuteen. Sytytyskulmaa säätämällä voidaan vaikuttaa sillan lähtöjännitteeseen ja sen avulla välipiirivirtaan ja edelleen käytön momenttiin. Konesillan ohjaus huolehtii sillan tyristorien sytytyksestä ja sytytyshetket on tahdistettu moottorin liikejännitteisiin.

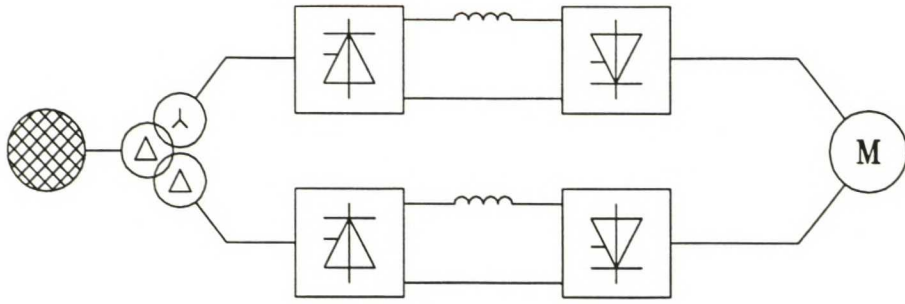
Koneen pyörimissuunnan vaihto toteutetaan konesillan tyristorien sytytysjärjestyä muuttamalla. Verkkoonjarrutus on mahdollista ohjaamalla konesilta tasa-suuntausalueelle ja verkkosilta vaihtosuuntausalueelle. Tällöin tehon virtaus-suunta kääntyy, mutta välipiirivirran suunta säilyy ennallaan. LCI-käyttö on siis luonnostaan nelikvadranttinen käyttö ilman mitään lisälaitteita.

Kuusipulssisilta kuluttaa aina induktiivista loistehoa. Verkkosilta ottaa tarvitsemansa loistehon syöttöverkosta, mutta konesillan tarvitsema loisteho on tuotettava käytön kuormamoottorina toimivalla tahtimoottorilla. Tämä on mahdollista, sillä tahtimoottori voidaan ohjata kapasitiiviseksi ylimagnetoimalla se, jolloin se kuluttaa kapasitiivista loistehoa eli tuottaa suuntaajan tarvitseman induktiivisen loistehon. Tähän tahtimoottorin ominaisuuteen käytön koko toiminta perustuu ja siitä se on saanut nimensäkin. Haittapuolena moottorin kapasitiivisessa ohjauksessa on moottorin loisvirta. Se kuormittaa moottoria, joka on tästä syystä rakennettava suuremmaksi kuin samantehoinen tehokertoimella yksi toimiva tahtimoottori.

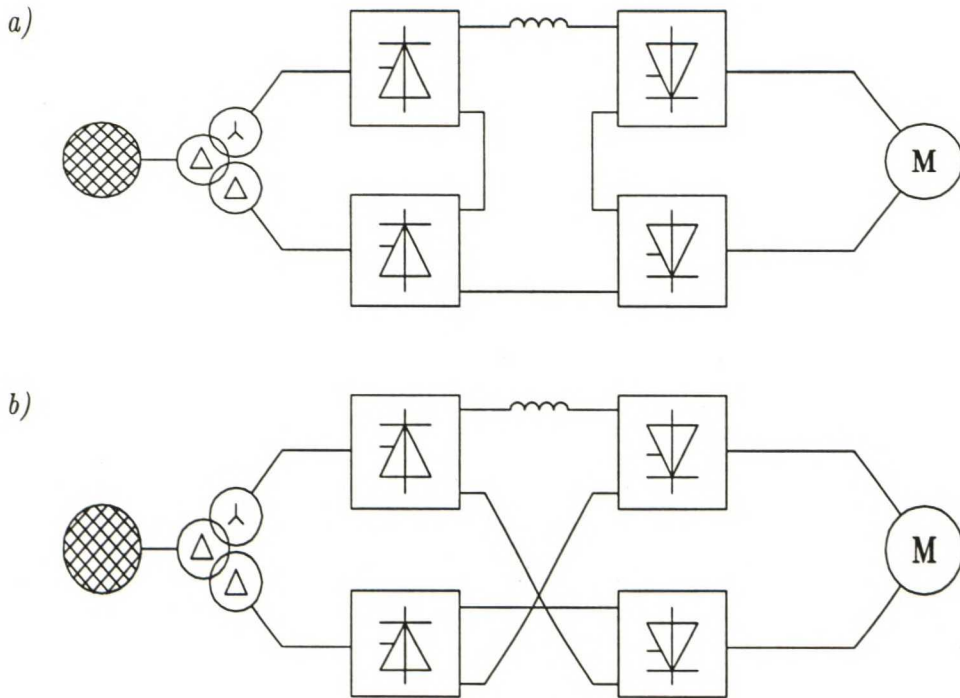
Tahtimoottorin vuo pidetään vakiona kentänheikennyspisteeseen saakka ja sitä pienennetään sen jälkeen kääntäen verrannollisena nopeuteen. Käytön askeltavan staattorivirran takia vuo seuraa ohjetta vain keskimäärin hetkellisarvon vaihdellessa koko ajan. Käytön tehokertoimen parantamiseksi voidaan käyttää myös ns. kentänvahvistusta eli nostaa vuota pienillä nopeuksilla.

2.1.2 Erilaisia LCI-kytkentöjä

Kuvan 2.1 kuusipulssisen peruskytkennän lisäksi LCI-käyttö voidaan rakentaa kuvien 2.2 ja 2.3 tavoin, jolloin suuntaaja on 12-pulssinen ja moottori 2×3-vaiheinen. Kuvan 2.2 tapauksessa suuntaaja on rinnankytketty, mutta se voidaan kytkeä myös sarjaan kuvan 2.3 tavalla. Rinnankytkennän etuja sarjakytkentään verrat-



Kuva 2.2. Rinnankytketty kaksitoistapulssinen LCI-käyttö



Kuva 2.3. Sarjaan kytkettyjä kaksitoistapulssisia LCI-käyttöjä

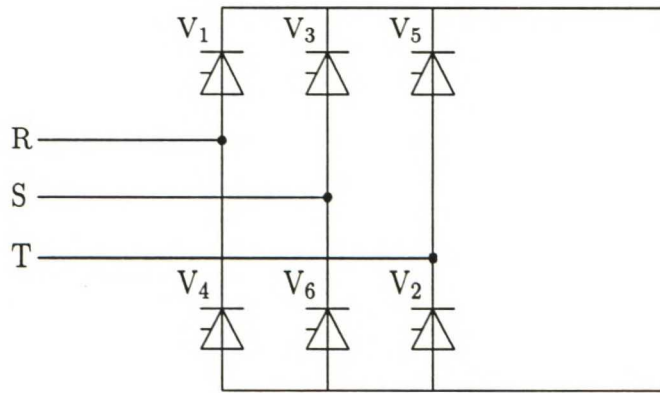
tuna ovat pienemmät momenttivärähtelyt pienillä nopeuksilla. Rinnankytkentä on myös toimintavarmempi; jos toinen staattoriipiiri vioittuu, toinen on yleensä kunnossa ja käyttöä voidaan ajaa noin puolella teholla. Voidaan jopa rakentaa käyttö, jossa vioittunut staattoriipiiri voidaan korjata käytön toimiessa korjauksen aikana ehjän piirin avulla [2]. Tällainen ratkaisu on järkevä laivakäytöissä, koska laivaa ei vikatilanteissa tarvitse välttämättä pysäyttää eikä aikataulusta näin jäädä kovin pahasti jälkeen.

Jos suuntaaja kytketään sarjaan kuvien 2.3 a tai 2.3 b mukaisesti, riittää yhden välipiirikuristimen käyttö. Sarjakytkennöistä kytkentävaihtoehto 2.3 b on parempi, sillä siinä välipiirin kiskojen suurin jännite maatasoon nähden on puolet pienempi kuin kytkennässä 2.3 a. Toiminnallisesti molemmat sarjakytkennät ovat samanlaiset.

2.1.3 Kuusipulssisilta

LCI-käytön suuntaajan peruskomponenttina on kuusipulssisilta. Kuusipulssisilta on lähes kaikkien varsinkin suurempitehoisten suuntaajatyyppejen peruskomponenttina useissa yhteyksissä analysoitu eikä sen teoriaa siksi käsitellä tässä kovin tarkasti.

Kuusipulssisillan muodostaa kaksi vaihtokytkintä, joihin kumpaankin kuuluu kolme kappaletta puolijohdekytkimiä. Puolijohdekytkimet ovat suuritehoisissa käytöissä tyristoreita, jotka on varustettu RC -suojin. Pienitehoisemmissa suuntaajissa myös muiden puolijohdekytkimien, kuten GTO-tyristorien, käyttö tulee kyseeseen. Sillan kytkentäkaavio ilman kytkentäapupiirejä on esitetty kuvassa 2.4. Kuvassa tyristorit on numeroitu yleisen tavan mukaisesti kommutointijärjestyksessä. Tyristorin V_1 syttymisen jälkeen seuraavaksi saa syttytyksen tyristori V_2 . Jatkossa tätä merkintätapaa käytetään myös konesillan tyristoreille. Yhtenäisyyden takia merkitään myös konesillassa eräistä lähteistä poiketen R-vaiheen ja pluskiskon välistä tyristoria V_1 .



Kuva 2.4. Kuusipulssisilta

Kun sillan ohjauskulma on α ja kommutointikulma μ , sillan lähtöjännite on

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_N \left[\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu) \right], \quad (2.1)$$

missä U_N on syöttöverkon pääjännitteen nimellinen tehollisarvo.

Lähtöjännitteen lausekkeesta voidaan todeta, että kommutointi aina pienentää sillan lähtöjännitettä. Sillan toimiessa vaihtosuuntaajana tasajännite on siis kommutointien ansiosta itseisarvoltaan suurempi kuin tasajännite tilanteessa, jossa kommutointiajaksi oletetaan nolla.

Kommutointien merkitys on LCI-käytössä suuri; perustuuhan käytön koko toi-

mintaperiaate tahtikoneen liikejännitteen mahdollistamiin konesillan kommutointeihin. Verkkosillan kommutoinnit puolestaan vaikuttavat verkkojännitteen käyrämuotoon ja ovat siten erityisen tärkeitä laivakäytöissä, joissa syöttöverkko on suhteellisen heikko.

Verkkosillan kommutoivana jännitteenä on verkkojännite ja kommutointiaika riippuu kommutoitavasta virrasta ja verkkoinduktansseista. Kommutointi säröyttää verkkojännitettä, sillä kommutoinnin aikana sillassa on kaksi vaihetta keskenään oikosulussa. Heikoissa verkoissa säröytyminen voi haitata muiden verkkoon kytkettyjen laitteiden toimintaa ja saattaa vaimentamattomana jopa estää muiden verkkoon mahdollisesti kytkettyjen käyttöjen toiminnan. Tästä syystä joudutaan joskus turvautumaan pahimpien särökomponenttien suodatuksen esimerkiksi viritettyjen LC -imupiirien avulla.

Suuntaajan syöttömuuntaja vaimentaa verkkojännitteen säröä, mutta käytöissä, joissa ei ole syöttömuuntajaa, kytketään verkkoon kommutoinnin verkkovaikutusten pienentämiseksi usein erityiset kommutointikuristimet. Vahvoissa verkoissa kommutoinnin aiheuttama särö ei ole ongelma, mutta niissä verkkosillan tyristorien anodivirran nousunopeus saattaa ilman syöttömuuntajaa ja kommutointikuristimia nousta tyristorien di/dt -kestoisuutta korkeammaksi.

Konesillan kommutoivana jännitteenä on tahtimoottorin pyöriessään indusoima liikejännite. Kommutointivirran nousunopeutta rajoittaa moottorin alkureaktanssi, joka LCI-käyttöjen moottoreissa on suhteellisarvona tyypillisesti noin $x_d'' = 0,15$. Se on vähemmän kuin muilla suuntaajatyypeillä syötettyjen moottoreiden alkureaktanssit, mutta joka tapauksessa niin suuri, ettei di/dt -kestoisuus ole ongelma konesillan puolella. Myöskään jännitteen säröytyminen ei ole moottorin puolella niin suuri ongelma kuin verkon puolella, koska moottorin rinnalle ei ole kytketty muita laitteita, joiden toiminta voisi häiriytyä kommutoinneista.

Moottorin alkureaktanssin on oltava pieni, jotta riittävän nopea kommutointi olisi mahdollinen. Nopea kommutointi mahdollistaa suuren konesillan sytytyskulman käytön, mikä puolestaan parantaa moottorin tehokerrointa ja vähentää moottorin vääntömomenttiväriähtelyä.

2.1.4 Kolmivaiheinen tahtimoottori

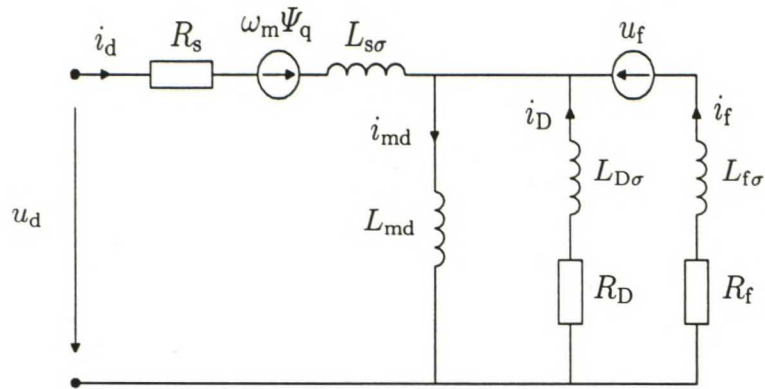
Käytön moottorina toimii tahtimoottori, joka voidaan ylimagnetoida kapasitiiviseksi, jolloin se voi tuottaa konesillan vaatiman ohjaus- ja kommutointiloistehon.

Nykyisin kiertokenttäkoneiden tutkimiseen käytetään pääasiassa kierto-osoitin-

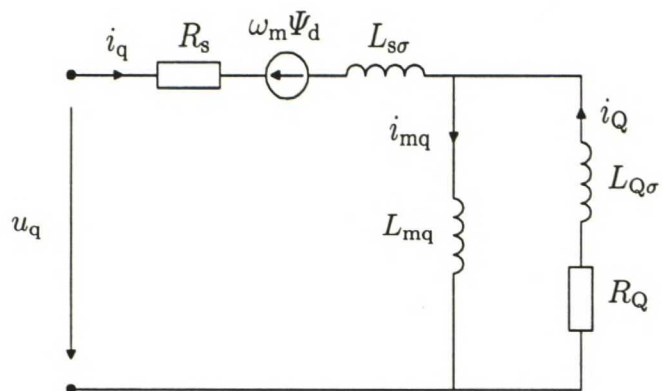
teorian mukaista mallia, jossa koneen sähkömagneettiset suuret kuvataan pyöri-
vien osoittimien avulla. Tahtikoneen muutosilmiöitä tutkittaessa käytetään yleis-
esti roottoriakseliin sidottua dq -koordinaatistoa. Avonapakoneiden magneettisen
epäsymmetrian takia joudutaan käyttämään kierto-osoittimien komponenttiesi-
tystä, jolloin koneen yhtälöistä tulee kaksiakseliteorian mukaisia [3].

Tässä ja seuraavassa kappaleessa esitettävissä yhtälöissä kaikki roottorisuureet on
reduoitu staattoriin. Tästä syystä redusointia ei ole erikseen merkitty näkyviin.

Tahtikoneen sijaiskytkentä pitkittäisakselin d suunnalla on esitetty kuvassa 2.5 ja
sijaiskytkentä poikittaisakselin q suunnalla kuvassa 2.6. Kuvien sijaiskytkentöjä



Kuva 2.5. Kolmivaiheisen tahtimoottorin sijaiskytkentä pitkittäisakselin suunnalla



Kuva 2.6. Kolmivaiheisen tahtimoottorin sijaiskytkentä poikittaisakselin suunnalla

vastaavat jänniteyhtälöt ovat

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_m \Psi_q \quad (2.2)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_m \Psi_d \quad (2.3)$$

$$0 = R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \quad (2.4)$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \quad (2.5)$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \quad (2.6)$$

$$u_0 = R_s i_0 + \frac{d\Psi_0}{dt}. \quad (2.7)$$

Kun roottorin sähköinen pyöriähdyskulma on

$$\vartheta = \vartheta_0 + \int_0^t \omega_m dt, \quad (2.8)$$

vaihejännitteet ovat jännitekomponenttien u_d , u_q ja u_0 sekä pyöriähdyskulman ϑ avulla

$$u_a = u_d \cos \vartheta - u_q \sin \vartheta + u_0 \quad (2.9)$$

$$u_b = u_d \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) - u_q \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) + u_0 \quad (2.10)$$

$$u_c = u_d \cos \left(\vartheta - \frac{4\pi}{3} \right) - u_q \sin \left(\vartheta - \frac{4\pi}{3} \right) + u_0. \quad (2.11)$$

Vuoyhtälöt ovat

$$\Psi_d = L_d i_d + L_{df} i_f + L_{dD} i_D \quad (2.12)$$

$$\Psi_q = L_q i_q + L_{qQ} i_Q \quad (2.13)$$

$$\Psi_D = L_{dD} i_d + L_{fD} i_f + L_D i_D \quad (2.14)$$

$$\Psi_Q = L_{qQ} i_q + L_Q i_Q \quad (2.15)$$

$$\Psi_f = L_{df} i_d + L_f i_f + L_{fD} i_D \quad (2.16)$$

$$\Psi_0 = L_0 i_0. \quad (2.17)$$

Kun itse moottori ei varsinaisesti ole tutkimuksen kohteena, vaan moottoria tarkastellaan koko sähkökäytön osana, voidaan riittävällä tarkkuudella olettaa, että

$$L_{df} = L_{dD} = L_{fD} = L_{md} \quad (2.18)$$

$$L_{qQ} = L_{mq}. \quad (2.19)$$

Kun vielä kirjoitetaan induktanssit käämin hajainduktanssin ja koneen pääinduktanssin summana

$$L_d = L_{s\sigma} + L_{md} \quad (2.20)$$

$$L_q = L_{s\sigma} + L_{mq} \quad (2.21)$$

$$L_D = L_{D\sigma} + L_{md} \quad (2.22)$$

$$L_Q = L_{Q\sigma} + L_{mq} \quad (2.23)$$

$$L_f = L_{f\sigma} + L_{md}, \quad (2.24)$$

vuoyhtälöt yksinkertaistuvat muotoon

$$\Psi_d = L_{s\sigma} i_d + L_{md} (i_d + i_f + i_D) \quad (2.25)$$

$$\Psi_q = L_{s\sigma} i_q + L_{mq} (i_q + i_Q) \quad (2.26)$$

$$\Psi_D = L_{D\sigma} i_D + L_{md} (i_d + i_f + i_D) \quad (2.27)$$

$$\Psi_Q = L_{Q\sigma} i_Q + L_{mq} (i_q + i_Q) \quad (2.28)$$

$$\Psi_f = L_{f\sigma} i_f + L_{md} (i_d + i_f + i_D) \quad (2.29)$$

$$\Psi_0 = L_0 i_0. \quad (2.30)$$

Lisäksi voidaan kirjoittaa liikeyhtälö

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = T_m - T_w, \quad (2.31)$$

missä T_m on moottorin ilmapäivämomentti ja T_w käytön vastamomentti. Ilmapäivämomentti on

$$T_m = \frac{3}{2} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (2.32)$$

ja potkurikäytön vastamomentti jatkuviissa ajotilanteissa

$$T_w = k \Omega_m^2, \quad (2.33)$$

missä k on potkurille ominainen vakio. Potkurin vastamomentti on avovesikäyrän mukainen. Se antaa vastamomentin oikein, kun potkurin nopeus vastaa laivan nopeutta, mutta ei päde muutostilanteissa. Esimerkiksi nopeassa suunnanvaihdossa vesi pyrkii pyörittämään potkuria ja käytön vastamomentti voi olla negatiivinen. Tällaisten tilanteiden tarkka laskenta edellyttää yksityiskohtaisempaa potkurimallia kuin kaavan (2.33) mukainen malli.

2.1.5 2×3-vaiheinen tahtimoottori

LCI-käytössä moottorin vääntömomentti ei ole vakio, vaan se vaihtelee jaksollisesti. Jaksonpituus on moottorin syöttötaajuus jaettuna suuntaajan pulssiluvulla, kuten kappaleessa 2.2.4 sivulta 34 alkaen esitetään. Tasaisemman vääntömomentin saavuttamiseksi käyttö voidaan rakentaa kuusipulssisen sijasta kaksitoistapulssiseksi. Tällöin käytön moottorin tulee olla kuusivaiheinen. Kuusivaiheisen moottorin vaihekäämejä ei ole järkevää jakaa staattorin kehälle symmetrisesti, vaan mieluummin kannattaa rakentaa kaksi 30 asteen vaihesiirrosta olevaa toisistaan eristettyä kolmivaihekäämitystä [4]. Tällaisen moottorin mallintamiseen ei voida käyttää tavallisen m -vaiheisen koneen kaksiakselimallia, sillä eri vaiheiden väliset induktiiviset kytkennät poikkeavat toisistaan. On kuitenkin kehitetty kaksiakselimalli, jossa staattorin hajainduktanssi koostuu kolmesta osasta [5]. Tällaisen koneen sijaiskytkennät d - ja q -akselien suunnilla on esitetty viitteen [4] mukaisesti modifioituina kuvissa 2.7 ja 2.8.

Kuvien kytkentöjä vastaavat jänniteyhtälöt ovat

$$u_{d1} = R_s i_{d1} + \frac{d\Psi_{d1}}{dt} - \omega_m \Psi_{q1} \quad (2.34)$$

$$u_{d2} = R_s i_{d2} + \frac{d\Psi_{d2}}{dt} - \omega_m \Psi_{q2} \quad (2.35)$$

$$u_{q1} = R_s i_{q1} + \frac{d\Psi_{q1}}{dt} + \omega_m \Psi_{d1} \quad (2.36)$$

$$u_{q2} = R_s i_{q2} + \frac{d\Psi_{q2}}{dt} + \omega_m \Psi_{d2} \quad (2.37)$$

$$0 = R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \quad (2.38)$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \quad (2.39)$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \quad (2.40)$$

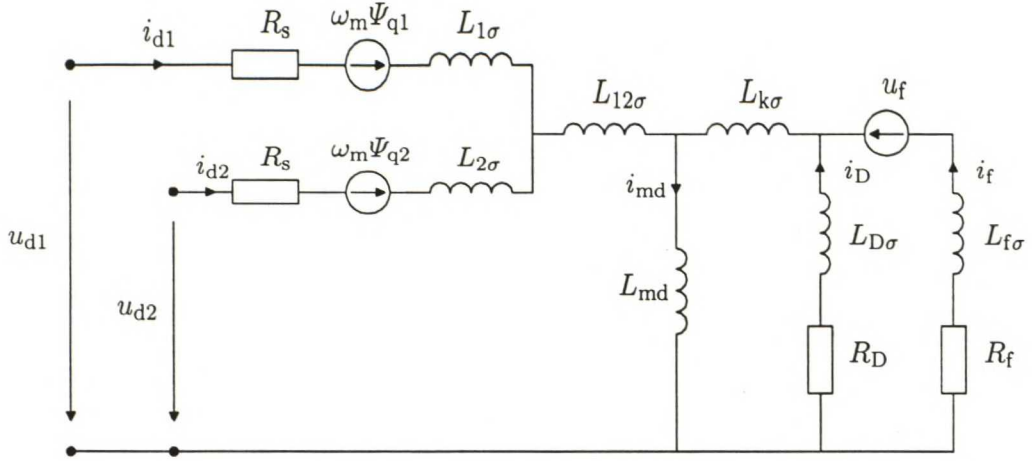
$$u_{01} = R_s i_{01} + \frac{d\Psi_{01}}{dt} \quad (2.41)$$

$$u_{02} = R_s i_{02} + \frac{d\Psi_{02}}{dt}. \quad (2.42)$$

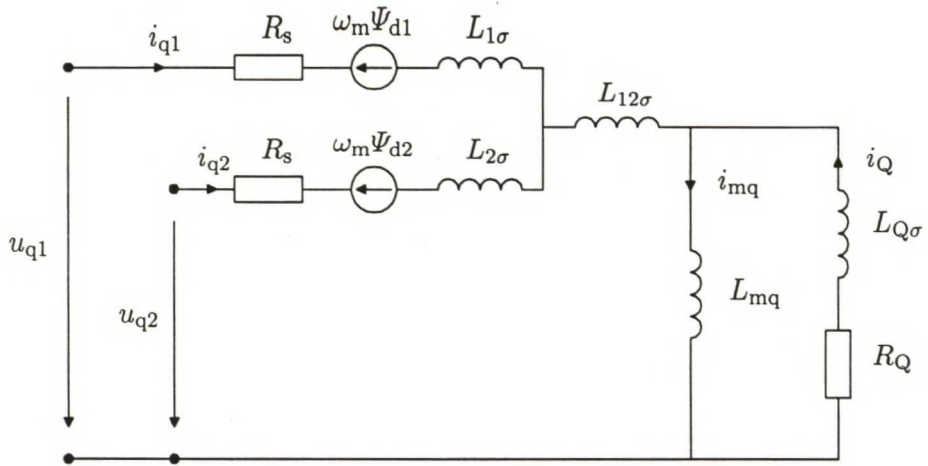
Vuoyhtälöt ovat

$$\Psi_{d1} = (L_{md} + L_{12\sigma} + L_{1\sigma}) i_{d1} + (L_{md} + L_{12\sigma}) i_{d2} + L_{md} i_D + L_{md} i_f \quad (2.43)$$

$$\Psi_{d2} = (L_{md} + L_{12\sigma}) i_{d1} + (L_{md} + L_{12\sigma} + L_{2\sigma}) i_{d2} + L_{md} i_D + L_{md} i_f \quad (2.44)$$



Kuva 2.7. Tahtimoottorin sijaiskytkentä d-suunnalla



Kuva 2.8. Tahtimoottorin sijaiskytkentä q-suunnalla

$$\Psi_D = L_{md}i_{d1} + L_{md}i_{d2} + (L_{md} + L_{k\sigma} + L_{D\sigma})i_D + (L_{md} + L_{k\sigma})i_f \quad (2.45)$$

$$\Psi_f = L_{md}i_{d1} + L_{md}i_{d2} + (L_{md} + L_{k\sigma})i_D + (L_{md} + L_{k\sigma} + L_{f\sigma})i_f \quad (2.46)$$

$$\Psi_{q1} = (L_{mq} + L_{12\sigma} + L_{1\sigma})i_{q1} + (L_{mq} + L_{12\sigma})i_{q2} + L_{mq}i_Q \quad (2.47)$$

$$\Psi_{q2} = (L_{mq} + L_{12\sigma})i_{q1} + (L_{mq} + L_{12\sigma} + L_{2\sigma})i_{q2} + L_{mq}i_Q \quad (2.48)$$

$$\Psi_Q = L_{mq}i_{q1} + L_{mq}i_{q2} + (L_{mq} + L_{Q\sigma})i_Q \quad (2.49)$$

$$\Psi_{01} = L_{01}i_{01} \quad (2.50)$$

$$\Psi_{02} = L_{02}i_{02}. \quad (2.51)$$

Ilmavälimomentti on

$$T_m = \frac{3}{2}p (\Psi_{d1}i_{q1} - \Psi_{q1}i_{d1} + \Psi_{d2}i_{q2} - \Psi_{q2}i_{d2}). \quad (2.52)$$

Kun ilmavälivuon komponentit Ψ_{md} ja Ψ_{mq} ovat

$$\Psi_{md} = L_{md} (i_{d1} + i_{d2} + i_D + i_f) \quad (2.53)$$

$$\Psi_{mq} = L_{mq} (i_{q1} + i_{q2} + i_Q), \quad (2.54)$$

ilmavälimomentin yhtälöksi saadaan

$$T_m = \frac{3}{2}p [\Psi_{md} (i_{q1} + i_{q2}) - \Psi_{mq} (i_{d1} + i_{d2})]. \quad (2.55)$$

Moottorin pyörähdyskulma on kaavan (2.8), liikeyhtälö kaavan (2.31) ja käytön vastamomentti kaavan (2.33) mukainen samaan tapaan kuin kolmivaiheisenkin moottorin tapauksessa.

2.1.6 Tahtimoottorin mitoituksesta

Kappaleen 2.1.1 mukaisesti LCI-käytön tahtimoottorin tehokerroin on kaikissa toimintapisteissä syötön puolelta katsottuna kapasitiivinen. Moottori on tästä syystä rakennettava suuremmaksi kuin samantehoinen tehokertoimella yksi toimiva tahtimoottori. Esimerkiksi suuritehoisilla propulsiomoottoreilla LCI-käytössä moottorin paino on tyypillisesti jännitteenohjaustavasta riippuen noin 20–30 % korkeampi kuin syklokonvertterikäytössä. Painoeron syynä on alhaisen tehokertoimen lisäksi LCI-käytön vaatima moottorin pieni alkureaktanssi. Moottoreiden hintaero ei kuitenkaan ole näin suuri, sillä kupariosien massat ja ei-aktiiviset osat, kuten laakerit, ovat lähes samat kummankin käytön moottoreilla [6]. Vertailussa on oletettu, että kummassakin käytössä moottoreiden napapariluku on sama. Käytännössä LCI-käyttäjien moottoreissa voidaan kuitenkin käyttää korkeampaa napaparilukua kuin syklokonvertterikäyttäjien moottoreissa, koska suuntaajan lähtötaajuuden ei LCI-käytössä tarvitse, toisin kuin syklokonvertterikäytössä, olla matala verrattuna syöttötaajuuteen. Tällöin moottorista tulee suurempi kooltaan, mutta ei välttämättä painoltaan. Kahdesta ulkomitoiltaan samankokoisesta moottorista se, jonka napapariluku on korkeampi, on kevyempi, koska staattori- ja roottoriselät voidaan rakentaa matalammiksi. Toisaalta useampien napojen rakentaminen tulee tyypillisesti kalliimmaksi, mutta kysymys on lähinnä valmistustekninen.

Kapasitiivinen tehokerroin merkitsee, että moottorin virta on jännitettä edellä. Vuopiiroksesta 2.9 havaitaan, että tällöin staattorivuo on itseisarvoltaan ilmavälivuota hieman pienempi, sillä staattorin hajainduktanssin luoma vuo on suunnaltaan yli 90 sähköastetta edellä ilmavälivuota. Moottorin vuo ohjataan yleensä

2.1.7 Välipiirikuristin

Välipiirikuristimen tarkka mitoitus on LCI-käytössä oleellista, sillä kuristimen koko vaikuttaa käytön toimintaan, tilantarpeeseen ja hintaan. Välipiirivirta ei ole tasaista, vaan se aaltoilee verkko- ja konesillan hetkellisten tasajännitteiden määräämällä tavalla. Aaltoilun amplitudi on sitä pienempää, mitä suurempi välipiirikuristimen induktanssi on, mutta suuri induktanssi merkitsee suurta, painavaa ja kallista kuristinta. Suuri kuristin heikentää myös käytön dynamiikkaa rajoittamalla virran nousunopeutta välipiirissä, mutta helpottaa samalla hyvän ylivirtasuojauksen suunnittelua ja toteutusta niiden vikatilanteiden varalta, joissa vikavirrat kulkevat välipiirissä [1]. Viitteessä [7] annetaan mitoitusohjeet kuristimelle, kun välipiirivirran suurin sallittu aaltoisuus $\sim i_{DC}$ on määrätty.

Kuusipulssisillan tasajännitepuolen jännitteen aaltoisuus määritellään sillan lähtöjännitteen hetkellisarvon ja tasakomponentin erotuksena.

$$\sim u = u_{di}(t) - u_{di\alpha} \quad (2.56)$$

Merkitään viitteen [7] tapaan verkkosillan tasajännitteen aaltoisuutta $\sim u_{diI}$ ja konesillan $\sim u_{diII}$ sekä koko käytön resistiivis-induktiivista pääpiiriä kuvaavaa suhteellista reaktanssia x_{zt} . Tällöin virran ja jännitteiden välillä pätee likimäärin differentiaaliyhtälö

$$\frac{x_{zt}}{\omega_n} \frac{d \sim i_{DC}}{dt} = \sim u_{diI} + \sim u_{diII}, \quad (2.57)$$

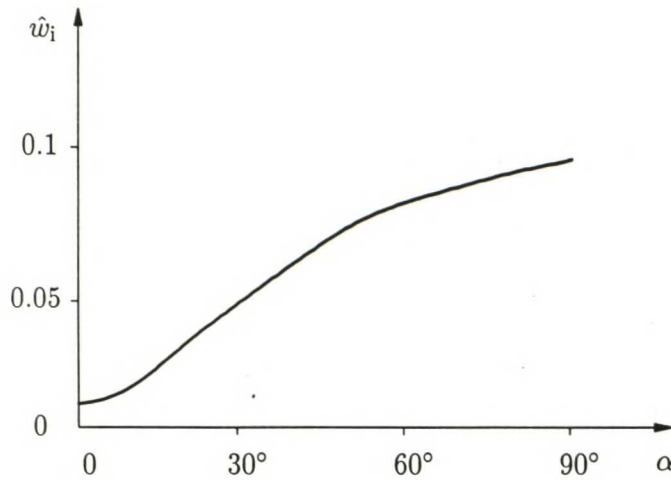
josta virran aaltoisuus ratkeaa integroimalla

$$\sim i_{DC} = \frac{\omega_n}{x_{zt}} \int (\sim u_{diI} + \sim u_{diII}) dt. \quad (2.58)$$

Virran aaltoisuus koostuu kahdesta komponentista kuten jännitteenkin, verkkosillan ja konesillan aiheuttamasta.

$$\sim i_{DC} = \sim i_{DCI} + \sim i_{DCII} \quad (2.59)$$

Aaltoisuus riippuu välipiirikuristimen induktanssin ohella moottorin pyörimisnopeudesta ja momenttitarpeesta. Myös siltojen ohjauskulmat vaikuttavat aaltoisuuteen. Suurimman aaltoisuuden selvittämiseksi on integroinnin sijasta helpompaa määrittää silloille aaltoisuuskertoimien huippuarvot \hat{w}_{iI} ja \hat{w}_{iII} kuvan 2.10 avulla. Kuvaan on piirretty yhden sillan aaltoisuuskertoimen huippuarvo sillan ohjauskulman funktiona, kun ohjauskulma on välillä $\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$. Ohjauskulman ollessa suurempi voidaan huippuarvo lukea kuvasta, kun käytetään kulmana redusoitua kulmaa $\beta = 180^\circ - \alpha$. Yhden sillan aaltoisuuskerroin on siis



Kuva 2.10. Aaltoisuuskertoimen huippuarvo sytytyskulman funktiona

symmetrinen sytytyskulman $\alpha = 90^\circ$ suhteen. Koko käytön aaltoisuuskertoimen huippuarvo \hat{w}_{iz} saadaan summasta

$$\hat{w}_{iz} = \frac{\omega_n}{\omega_N} u_{di0I} \hat{w}_{iI} + \hat{w}_{iII}, \quad (2.60)$$

missä u_{di0I} on verkkosillan ideaalinen lähtöjännite suhteellisarvona ohjauskulman ollessa $\alpha = 0^\circ$, ω_n moottorin syöttötaajuus ja ω_N syöttöverkon taajuus. Kertoimien määrittämistä on käsitelty tarkemmin viitteessä [7].

Aaltoisuuskertoimen avulla saadaan virran suurimmaksi aaltoisuudeksi

$$\hat{i}_{DC} = \frac{\hat{w}_{iz}}{x_{zt}}, \quad (2.61)$$

Virran suurin sallittu aaltoisuus oli mitoituksen lähtökohtana, joten kaavasta voidaan ratkaista x_{zt} . Sen avulla välipiirikuristimen induktanssiksi saadaan viitteen [7] tapaan

$$L_{DC} = \frac{6}{\omega_N \pi} \left(\frac{3\omega_N}{\pi\omega_n} x_{zt} - x_k u_{di0I} \right) \frac{U_n}{I_n}, \quad (2.62)$$

missä U_n on moottorin nimellinen pääjännite ja I_n nimellisvirta.

Pienitehoisissa LCI-käytöissä kytketään välipiirikuristimen rinnalle joskus ylimääräinen tyristori [8]. Tällöin konesillan ottama virta voidaan toimittaessa kappaleessa 2.2.3 selostettavalla pulssimaisen virran alueella pudottaa nopeasti nolnaan oikosulkemalla välipiirikuristin tyristorin kautta. Laivakäytöissä tyristorin kytkeminen ei ole perusteltua, koska pulssimaisen virran alueella toimitaan tyypillisesti suhteellisen vähän ja koska suuritehoisissa käytöissä tyristorin hinta ohjaus- ja suojauslaitteineen on saavutettavaan hyötyyn nähden liian korkea.

toimintaan nähden hitaasti muuttuvasta nopeudesta, verkkosillan lähtöjännitteen muutokset vaikuttavat välipiirivirtaan. Välipiirivirran muutokset muuttavat moottorin nopeutta käytön momenttitarvetta vastaavaan tasapainotilaan. Moottorin vuo pidetään vakiona, kun moottorin suhteellinen pyörimisnopeus on kentänheikennyspisteen γ alapuolella. Suuremmilla nopeuksilla vuo laskee kääntäen verrannollisena nopeuteen. Vuo pidetään nopeuden mukaisessa ohjearvossaan säätämällä napapyörävirtaa magnetointisillan lähtöjännitteen avulla. Vuon oloarvo lasketaan moottorin mitatuista virroista.

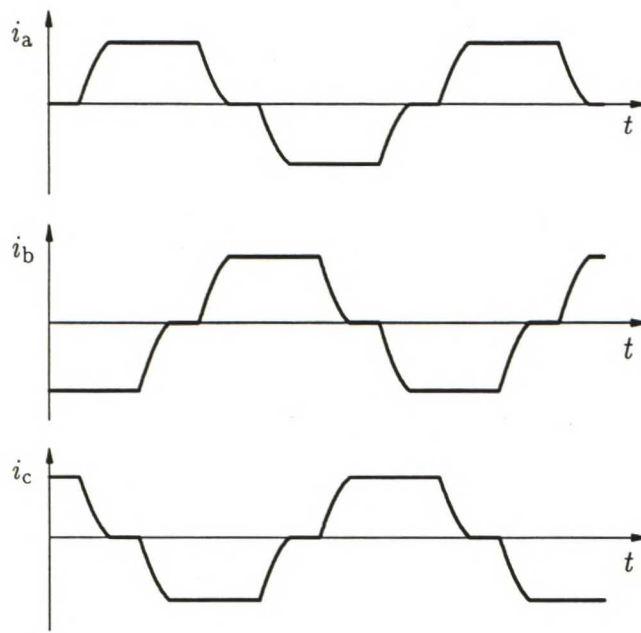
Tällainen tahtimoottorin ohjaus ei ole sovelias kaikkein vaativimpiin käyttöihin. Laivakäyttöihin ja niistä varsinkin risteilijäkäyttöihin, joissa pääosa käyttöajasta ajetaan lähes vakiona pysyvällä nopeudella, esitetty menetelmä on kuitenkin täysin riittävä. Jäänmurtaajissa ja muissa erikoisaluksissa vaatimukset käytöltä ovat usein tiukemmat ja niihin esitetty menetelmä ei ole hyvä ratkaisu, vaan parempaan tulokseen päästään valitsemalla ohjaustavaksi vektoriohjaus. Tällöin suuntaajaksi kannattaa valita esimerkiksi syklokonvertteri, sillä konekommutoitu suuntaaja ei ole sopiva vektoriohjaukseen [9]. Syynä tähän on, että LCI-käytössä moottorin staattorivirtoja ei voida vapaasti ohjata, koska konesillan kommutointikyky tulee aina varmistaa riittävän pienellä sytytyskulmalla.

2.2.2 Toiminta nimellisnopeudella

LCI-käytön toimintaperiaatteen takia käyttöä ei ole tarkoitettu ajettavaksi jatkuvasti pienillä nopeuksilla. Pienillä nopeuksilla tarkoitetaan käytöstä riippuen alle 5–20 % nimellisestä olevia nopeuksia. Käsitellään aluksi käytön toimintaa nimellisnopeudella ja vasta myöhemmin pienten nopeuksien aluetta, jota tarvitaan esimerkiksi käynnistyksessä.

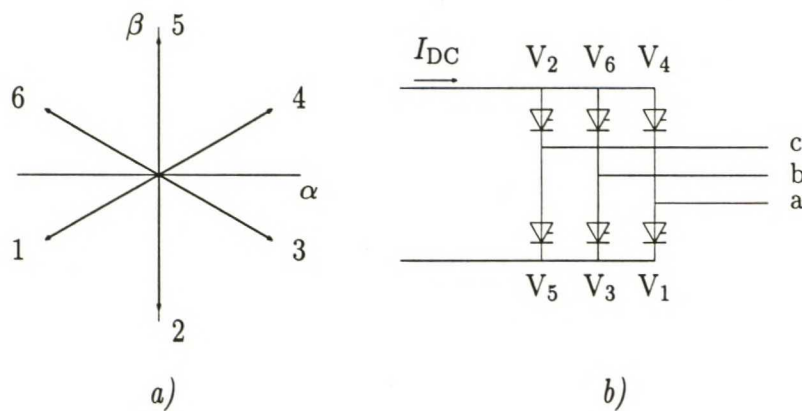
Moottorin vaihevirtojen kuvaajat aikatasossa on esitetty kuvassa 2.12. Vaihevirtojen 'palkkimaisuudesta' seuraa monenlaisia ongelmia. Moottorin vaihevirta sisältää runsaasti yliaaltoja, jotka rasittavat koneen staattorikäämiä ja voivat aiheuttaa ääni-ilmiöitä. Hankalampi ongelma on moottorin vääntömomentin askeltaminen. Staattorivirran hyppäykset vaikuttavat myös koneen vuohon. Napakäämin avulla vuon hetkellisarvoa ei ole käytännössä mahdollista pitää vakiona, mutta vahva vaimennuskäämi on käytölle edullinen vaimentaessaan nopeataajuisia vuomuutoksia. Joka tapauksessa koneen vuon ja virtojen muutokset saavat akselimomentin askeltamaan kappaleessa 2.2.4 esitettävällä tavalla.

Staattoriin sidotussa α, β -koordinaatistossa staattorivirran kierto-osoitin voi saada kommutointien välillä kuusi erilaista arvoa. Osoitin on kommutointien välillä vakio ja hyppää kommutoinnin aikana 60 sähköastetta eteenpäin. Jos tasavirta



Kuva 2.12. Staattorin vaihevirrat ajan funktiona.

pysyy vakiona, voidaan osoittaa, että hyppäyksen aikana kierto-osoittimen kärjen piirtämä ura kulkee lineaarisesti vakio-osoittimien kärkien välillä. Merkitään vaihevirran huippuarvoksi suhteellisarvona yksi ja numeroidaan virtaosoittimet ja konesillan tyristorit kuvan 2.13 mukaisesti. Tällöin virtaosoittimet ovat johtavien tyristorien perusteella sivulla 32 olevan taulukon 2.1 mukaiset.



Kuva 2.13. a) Staattorivirran kierto-osoittimet b) Konesilta

Tarkastellaan kuvaa 2.13. Oletetaan aluksi, että moottorin virta on nimellinen ja että moottori pyörii nimellisnopeudella positiiviseen pyörimissuuntaan. Oletetaan lisäksi, että tyristorit 4 ja 5 johtavat. Taulukon 2.1 mukaisesti staattorivirran kierto-osoitin on osoitin 4. Konesillan ohjauskulmaa 180 sähköastetta vastaava

Taulukko 2.1. Staattorivirran kierto-osoittimet johtavien tyristoreiden mukaan.

Johtavat tyristorit	i_a	i_b	i_c	Staattorivirran kierto-osoitin	Osoittimen numero kuvan 2.13 a mukaan
1 ja 2	-1	0	1	$-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}$	1
2 ja 3	0	-1	1	$-j1$	2
3 ja 4	1	-1	0	$\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}$	3
4 ja 5	1	0	-1	$\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}$	4
5 ja 6	0	1	-1	$j1$	5
6 ja 1	-1	1	0	$-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}$	6

tyristorien 5 ja 6 sytytyskohta on hetki, jolloin moottorin vuon kulma on sivulla 34 olevan taulukon 2.2 mukaisesti $\frac{11\pi}{6}$. Kommutoinnin takia todellinen sytytyshetki on hieman tätä ennen, mutta kulman määrittämiseen palataan seuraavassa pienillä nopeuksilla ajamista käsittelevässä kappaleessa. Sytytyshetkestä eteenpäin tyristorit 5 ja 6 saavat hilapulsseja ja konesillassa on johtavassa tilassa kolme tyristoria, 4, 5 ja 6, kunnes kommutointi tyristorilta 4 tyristorille 6 on päättynyt, minkä jälkeen vain tyristorit 5 ja 6 johtavat.

2.2.3 Toiminta pienillä nopeuksilla

Konesillan kommutoinnin aikana sillan toiseen kiskoon liittyvistä tyristoreista kaksi johtaa ja näiden johtoaikana välipiirin virta siirtyy kulkemaan moottorin jättävältä vaiheelta uudelle vaiheelle. Kommutointipiiriin kuuluu molempien kommutointiin osallistuvien vaiheiden resistanssit ja alkureaktanssit sekä moottorin liikejännite, joka vallitsee kommutoituvien vaiheiden välillä kommutoinnin aikana. Liikejännite on sinimuotoinen ja vakiovuoalueella sen amplitudi ja taajuus ovat suoraan verrannollisia moottorin pyörimisnopeuteen.

Oletetaan aluksi, että eri nopeuksilla moottorin virta on sama ja että kommutointipiirin resistanssi on nolla. Merkitään kommutointipiiriin induktanssia L_k . Kommutointipiirin virta i_k muuttuu verrannollisena kommutoituvan pääjännitteen

u_δ aikaintegraaliin

$$i_k(t) = \frac{1}{L_k} \int_0^t u_\delta(t) dt. \quad (2.63)$$

Kommutointi päättyy, kun virta i_k on kasvanut kommutoitavan virran suuruiseksi. Vakiovirtaa kommutoitaessa integraalin arvo on vakio, joten integrointiin kuluva aika t riippuu kommutoivasta pääjännitteestä. Pienillä nopeuksilla jännite on pieni ja kommutointiaika on pidempi kuin suurilla nopeuksilla, mutta koska jännitteen taajuus on myös vastaavasti pienempi, kommutointikulma on riippumaton nopeudesta. Kommutointi ei siis riipu nopeudesta muulloin kuin täsmälleen nollanopeudella, jolloin liikejännitettä ei indusoidu moottoriin.

Käytännössä moottorin staattoriresistanssi ei ole nolla ja kommutointipiiriin sisältyy aina resistanssia. Suurilla nopeuksilla resistanssin aiheuttama jännitehäviö kommutointipiirissä on merkityksetön suhteessa moottoriin indusoituneeseen liikejännitteeseen ja kommutointi on ongelmaton. Sen sijaan pienillä nopeuksilla resistanssin yli oleva jännite on suuri verrattuna liikejännitteeseen ja vaikuttaa merkittävästi kommutointipiirin virran kehittymiseen. Kommutointiaika ja myös kommutointikulma ovat resistanssin ansiosta pidempiä kuin ilman resistanssin vaikutusta. Riittävän pienillä nopeuksilla kommutointi ei ennätä päättyä, ennen kuin kommutoiva pääjännite muuttuu negatiiviseksi, ja kommutointi epäonnistuu. Näillä nopeuksilla virran siirtämiseksi tyristorilta toiselle on turvauduttava konekommutoinnin sijasta vaihtoehtoisin keinoin.

Suuritehoisissa käytöissä yleisesti käytetty keino on pakottaa pienillä nopeuksilla välipiirin virta nolaksi kommutointihetkellä. Tällä pulssimaisen virran alueella moottoria ajetaan ikään kuin askelmoottorina. Kommutointien välillä johtaa kaksi tyristoria aivan kuten suurillakin nopeuksilla ajettaessa. Virran siirtämiseksi tyristorilta toiselle välipiirin virta pakotetaan nolaksi kääntämällä verkkosillan lähtöjännite negatiiviseksi, jolloin silta alkaa toimia vaihtosuuntaajana ja syöttää tehoa verkkoon. Kun konesillan tyristorit ovat sammuneet ja saavuttaneet myötäestokykynsä, seuraava tyristoripari voidaan sytyttää. Sytytetty tyristoripari riippuu koneen vuosta, pyörimisnopeudesta ja käytöltä halutun momentin suunnasta. Halutun momentin ollessa positiivinen käyttö toimii normaaliin tapaan moottorina ja momentin ollessa negatiivinen jarrugeneraattorina. Generaattorikäyttöä tarvitaan tilanteissa, joissa konetta on hidastettava nopeammin, kuin pelkän vastamomentin avulla on mahdollista. Taulukossa 2.2 on esitetty sytytettävä staattorivirtaasoitin, kun edellä mainitut suureet tunnetaan.

Viitteessä [10] on tarkasteltu muita mahdollisia LCI-käytön käynnistystapoja. Viitteessä esitetään, että tahtimoottorin staattoriresistanssi on mahdollista rakentaa niin pieneksi, että moottori ehtii kiihtyä ennen ensimmäistä kommutointia niin suureen nopeuteen, että normaali konekommutointi on mahdollinen. Tällainen

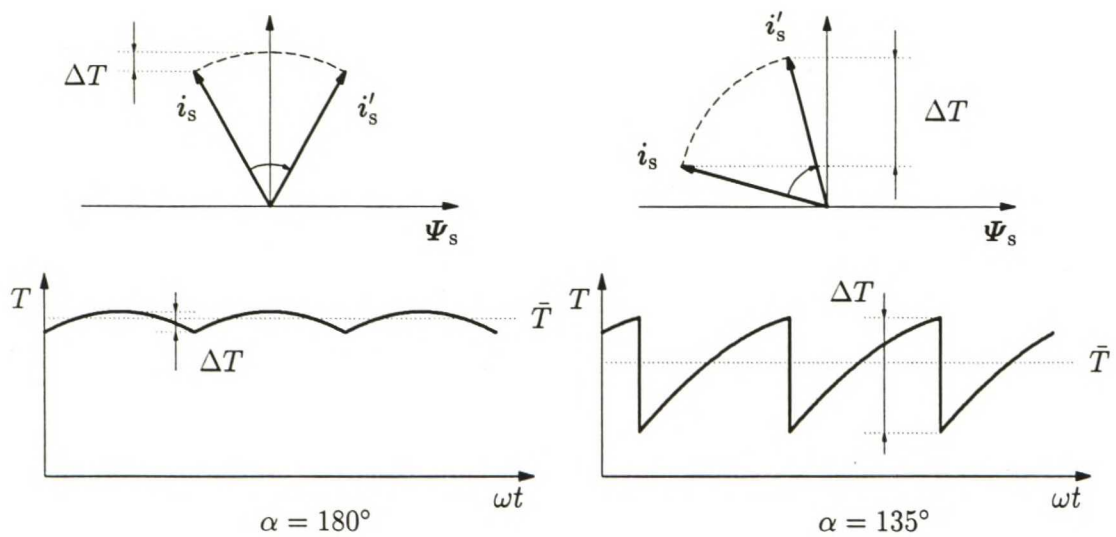
Taulukko 2.2. Sytytettävä virtaosoitin

Vuon kulma	$\omega < 0$		$\omega \geq 0$	
	Moottori	Generaattori	Moottori	Generaattori
$\frac{\pi}{6}$	2	5	6	3
$\frac{\pi}{2}$	3	6	1	4
$\frac{5\pi}{6}$	4	1	2	5
$\frac{7\pi}{6}$	5	2	3	6
$\frac{3\pi}{2}$	6	3	4	1
$\frac{11\pi}{6}$	1	4	5	2

menettely ei sovellu laivakäyttöihin, koska käyttöjen hitausmassat ovat tyypillisesti niin suuria ja syöttöverkko niin heikko, ettei viitteen mukaisen käynnistykseen vaatimaa kiihdytystä voida toteuttaa.

2.2.4 Vääntömomenttivärähtelyt

Käytön moottorin momentti voidaan laskea, kun konesillan ohjauskulma tunnetaan. Kuusipulssisen käytön staattorivirtaosoitin kiertää vuon koordinaatissa osoittimen johtoaikana $\pi/3$ sähköradiaania kuvan 2.14 yläosan mukaisesti. Kuvassa on havainnollistettu momentin muodostumista sytytyskulman arvoilla $\alpha = 180^\circ$ ja $\alpha = 135^\circ$. Välipiirivirran oletetaan olevan täysin tasoittunutta ja kommutointiaika oletetaan nolllaksi. Kuvassa on merkitty staattorivirran osoitinta johtoaajan alussa i_s ja johtoaajan lopussa i'_s sekä staattorivuon osoitinta Ψ_s . Virtaosoitin kiertyy, koska piirroksen koordinaatisto on sidottu vuohon. Momentti on verrannollinen osoittimen projektioon vuota vastaan kohtisuoralla akselilla. Kuvan alaosassa on esitetty momentti pyörähdyskulman funktiona. Momentti askeltaa taajudella, joka on kuusipulssisessa käytössä kuusi kertaa moottorin syöt-



Kuva 2.14. LCI-käytön vääntömomentin muodostuminen konesillan eri sytytyskulmilla

tötaajuus. Keskimääräiseksi momentiksi saadaan

$$\bar{T} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha - \frac{2\pi}{3}}^{\alpha - \frac{\pi}{3}} T(\vartheta) d\vartheta. \quad (2.64)$$

Sytytyskulman ollessa $150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ momentin suurin hetkellisarvo ei riipu sytytyskulmasta. Merkitään sitä T_{\max} . Kulman ollessa $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ momentin suurin hetkellisarvo on $T_{\max, \alpha} = T_{\max} \sin(\alpha - \frac{\pi}{3})$. Momentin pienin hetkellisarvo on molemmissa tapauksissa $T_{\min, \alpha} = T_{\max} \sin(\alpha - \frac{2\pi}{3})$. Momentin suurimman pienimmän arvon erotus on

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (2.65)$$

ja keskimääräinen momentti

$$\bar{T} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha - \frac{2\pi}{3}}^{\alpha - \frac{\pi}{3}} T_{\max} \sin \vartheta d\vartheta = -\frac{3}{\pi} T_{\max} \cos \alpha. \quad (2.66)$$

Keskimääräinen momentti on suurimmillaan, kun konesillan sytytyskulma on $\alpha = 180^\circ$, ja se alenee kulmaa pienennettäessä.

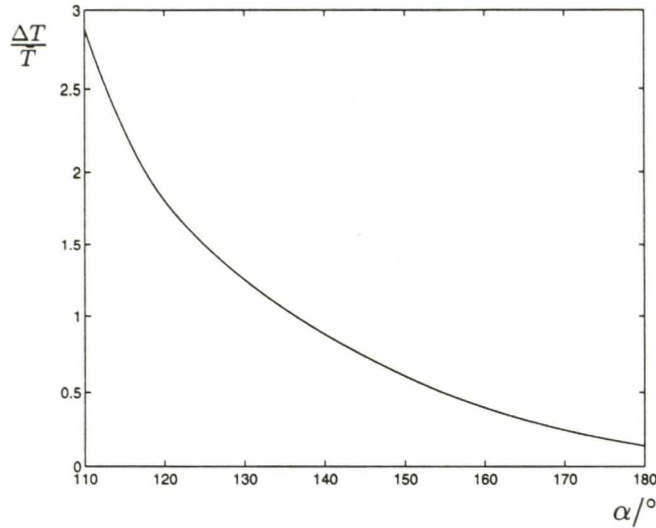
Erotuksen ΔT suhde keskimääräiseen momenttiin \bar{T} kuvaa momentin aaltoisuutta

$$\frac{\Delta T}{\bar{T}} = \begin{cases} \frac{T_{\max} \sin(\alpha - \frac{\pi}{3}) - T_{\max} \sin(\alpha - \frac{2\pi}{3})}{-\frac{3}{\pi} T_{\max} \cos \alpha}, & \text{kun } 90^\circ \leq \alpha < 150^\circ \\ \frac{T_{\max} - T_{\max} \sin(\alpha - \frac{2\pi}{3})}{-\frac{3}{\pi} T_{\max} \cos \alpha}, & \text{kun } 150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (2.67)$$

Aaltoisuus sievenee muotoon

$$\frac{\Delta T}{T} = \begin{cases} -\frac{\pi}{3} \tan \alpha, & \text{kun } 90^\circ \leq \alpha < 150^\circ \\ -\frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{\cos \alpha} + \frac{1}{2} \tan \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \right), & \text{kun } 150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (2.68)$$

Momentin aaltoisuus määritettynä kaavan (2.68) mukaisesti on piirretty sytytyskulman funktiona kuvaan 2.15. Kuvasta nähdään, että alle noin 130° sytytys-



Kuva 2.15. Vääntömomentin aaltoisuus konesillan sytytyskulman funktiona

kulmilla aaltoisuus on jo hyvin voimakasta ja se kasvaa jyrkästi kulmaa pienennettäessä. Tästä syystä tämän alueen käyttöä tulee välttää muulloin kuin niissä muutostilanteissa, joissa se on välttämätöntä. Esimerkiksi suunnanvaihdossa konesilta ohjataan tasasuuntausalueelle, jolloin sen sytytyskulma on hetken aikaa 90° ympäristössä.

Tässä kappaleessa on tarkasteltu LCI-käytön moottorin vääntömomenttia teoreettisesti, kun kommutointiajaksi oletetaan nolla ja välipiirin induktanssin oletetaan olevan niin suuri, että välipiirin virta on täysin tasaista. Tarkastelusta selviää, että käytön momentti on tässä yksinkertaistetussakin tapauksessa epätasainen ja ettei sitä ole mahdollista saada täysin tasaiseksi.

Todellisissa käytöissä kommutointiaika ei ole nolla eikä välipiirin induktanssi ole ääretön. Nämä epäideaalisuudet muuttavat virran ja momentin käyrämuotoja, mutta niiden ottaminen huomioon tekee analyysistä hyvin hankalan. Kvalitatiivisesti voidaan todeta, että äärellinen induktanssi kytkee kaksi säröytynyttä verkkoa, syöttöverkon ja moottoripiirin, toisiinsa tavalla, joka mahdollistaa yliaaltojen siirtymisen verkosta toiseen. Lisäksi sekä verkko- että konesilta tuottavat yliaaltoja, jotka näkyvät välipiirin virrassa ja moottorin momentissa. Kun vielä

kummankin sillan kommutointi säröyttää sekä virtaa että jännitettä, lopullinen välipiirivirta sisältää hyvin paljon erilaisia taajuuskomponentteja. Osa näistä on alemmilla taajuuksilla kuin kummankaan vaihtosähköverkon perustaajuus, jolloin niitä voidaan kutsua aliharmonisiksi aalloiksi, vaikka momentin toivottu spektri-komponentti onkin tasakomponentti.

Koneen vääntömomentti on virran ja vuon ristitulo, joten välipiirivirran lisäksi momenttiin vaikuttavat vuon muutokset. Vuon muuttamiseen osallistuvat kaikki moottorin virralliset käämit, jolloin välipiirivirran yliaallot näkyvät myös vuossa. Myös magnetointisillan tuottamat yliaallot vaikuttavat vuohon.

Kaikkien näiden vaikutusten tuloksena moottorin vääntömomentti on varsin epätasainen. Moottorin induktanssit vaimentavat virtojen korkeataajuisia yliaaltoja melko tehokkaasti, mutta matalataajuisemmat yliaallot ja varsinkin aliharmoniset aallot näkyvät selvästi momentissa. Vakavinta on, jos aliharmoniset aallot sattuvat voimakkaina taajuuksille, joilla voi esiintyä mekaaninen resonanssi. Tällöin on olemassa jopa laitteiston rikkoutumisen vaara.

Epätasaista välipiirivirtaa on käsitelty tarkemmin mm. viitteissä [11] ja [12]. Viitteet eivät käsittele LCI-käyttöä, mutta niiden tuloksia voidaan soveltaa myös LCI-käyttöön. Viitteessä [13] on käsitelty välipiirivirran ja vääntömomentin epätasaisuutta LCI-käytön tapauksessa ja esitetty tietokonelaskentaan soveltuva menetelmä, joka ottaa nämä epäideaalisuudet huomioon.

2.2.5 Kommutointivaran säätö

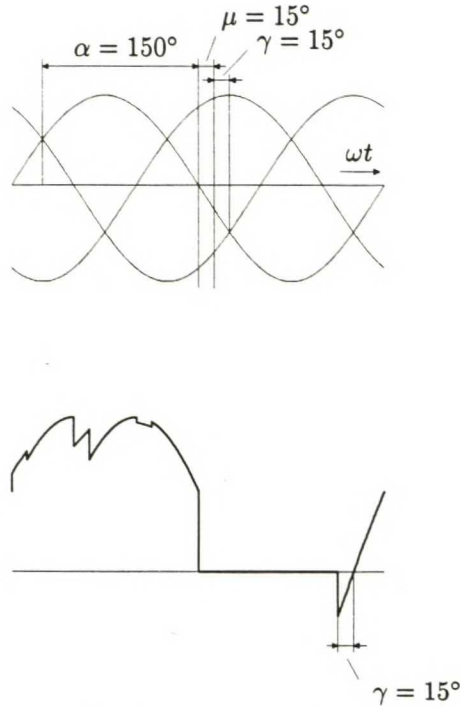
Konesillan sytytyskulma on aina alle 180 sähköastetta, koska moottorin virran kommutointi tyristorilta toiselle kestää kommutointiajan, joka ei ole nolla. Kommutoinnin tulee ehdottomasti päättyä, ennen kuin kommutoiva pääjännite muuttuu negatiiviseksi. Tämän varmistamiseksi kommutointi mitoitetaan päättymään jo kommutointivaran γ verran ennen kriittistä 180 sähköasteen hetkeä. Pieni konesillan sytytyskulma merkitsee huonoa moottorin tehokerrointa. Myös moottorin vääntömomentin aaltoisuus pahenee sytytyskulmaa pienennettäessä kappaleessa 2.2.4 esitetyllä tavalla. Kommutointivara on siis järkevää mitoittaa niin pieneksi, kuin turvallisesti on mahdollista.

Kuvassa 2.16 on esitetty moottorin liikejännitteet ja yhden tyristorin yli oleva jännite tilanteessa, jossa konesillan sytytyskulma $\alpha = 150^\circ$ ja kommutointikulma $\mu = 15^\circ$. Kommutoinnin jälkeen tyristorille jää vielä kulmaa $\gamma = 15^\circ$ vastaava aika toipua, ennen kuin sen yli oleva jännite muuttuu positiiviseksi. Tätä aikaa

kutsutaan marginaaliajaksi t_m ja se voidaan laskea kulman γ avulla kaavasta

$$t_m = \gamma / \omega_m, \quad (2.69)$$

missä ω_m on moottorin sähköinen kulmanopeus.



Kuva 2.16. Tyristorin yli oleva jännite ja kommutoiva pääjännite

LCI-käyttöön voidaan toteuttaa säätö, joka mittaa kommutointivaran ja säätää sen haluttuun arvoon. Säädön etuna on, että kommutointi tapahtuu aina turvalisesti ilman konesillan kippausvaaraa ja koneen tehokerroin on silti mahdollisimman hyvä.

Säätöpiirissä marginaaliajan ohjearvosta vähennetään mitattu oloarvo, jolloin saadaan marginaaliajan erosuure. Erosuureeseen lisätään korjausterminä pyörimisnopeuskorjaus. Korjauksen suuruus riippuu moottorin nopeudesta. Sen tarkoituksena on ottaa huomioon moottorin staattori-resistanssissa tapahtuva jännitehäviö, joka on pienillä nopeuksilla suuri suhteessa liikejännitteeseen. Nopeudella korjattu erosuure viedään PI-säätimelle. Säätimen lähtöön lisätään vielä välipiirivirrasta riippuva termi ja summan perusteella sytytyslogiikka laskee konesillan sytytyskulman ja muodostaa sytytyspulssit. Välipiirivirtakorjaus tarvitaan, koska kommutointiaika riippuu virrasta ja virtamuutokset voivat dynaamisissa ajotilanteissa olla niin nopeita, etteivät marginaaliajan mittausta ja PI-säädin kykene ilman myötäkytkentää riittävän nopeasti muuttamaan sytytyslogiikalle menevää signaalia.

Kommutointivaran säädöllä ja staattorivuon stabiloinnilla varustettu säätö tar-

joaa kaikkein tehokkaimman LCI-tahtimoottorikäytön, jos asiaa ajatellaan käytön ylikuormitettavuuden kannalta [14]. Kommutointivaran säädön käyttö parantaa myös moottorin tehokerrointa, mutta silti säätö on luonteeltaan enemmänkin käytön turvallisuutta parantava, sillä saavutettu tehokertoimen parannus ei ole kovin suuri. Jos esimerkiksi oletetaan kommutointivaran säätämättömässä käytössä olevan liian pitkä, merkitsee se liian pientä konesillan sytytyskulmaa. Sytytyskulman suurentaminen kuitenkin alentaa liikejännitteistä muodostuvaa kommutointijännitettä, jolloin kommutointiaika pitenee. Kommutointiajan piteneminen pienentää edelleen kommutointivaraa. Näin kommutointivara pienenee enemmän kuin sytytyskulmaa nostettiin ja lopullinen säädön tuoma sytytyskulman kasvu jää vaatimattomaksi.

Tässä diplomityössä kommutointivaran säätöä ei ole käytetty, koska laivakäytöissä ei tyypillisesti vaadita suuria virtoja pienillä pyörimisnopeuksilla jatkuvissa ajotilanteissa. Myöskään virtojen nousunopeudet eivät yleensä ole kovin suuria, koska laivaverkko ei dieselmootoreiden takia kykene vastaamaan nopeasti suuriin muutoksiin tehotarpeessa.

Luku 3

Simuloinnista

3.1 Simulointiohjelmisto

Työssä on luotu LCI-tahtimoottorikäytön malli Saber-simulointiohjelmistolla¹. Ohjelmiston avulla voidaan simuloida analogisia ja digitaalisia komponentteja sisältäviä järjestelmiä.

Ohjelmistoon kuuluu useimpien laajojen simulointiohjelmistojen tapaan esikäsittelijä, ratkaisija ja jälkikäsittelijä. Esikäsittelijän avulla muodostetaan interaktiivisesti simuloitavan mallin rakenne ja syötetään tarvittavat parametrit ohjelmistoon. Esikäsittelijä muodostaa syöttötietojen perusteella verkkoyhtälöt, jotka syötetään lähtötietoina ratkaisijalle. Ratkaisijassa käyttäjä voi valita erilaisia laskennan nopeuteen ja tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä mieleisikseen. Tällaisia ovat mm. sallitut pyöristysvirheet ja käytetty integrointimenetelmä. Jälkikäsittelijällä voidaan laskettuja tuloksia tarkastella graafisesti ja niitä voidaan muokata tiettyjen laskurutiinien avulla havainnollisempaan muotoon. Esimerkiksi transienttianalyysin tuloksena saaduille aikatazon signaaleille voidaan suorittaa säröanalyysi Fourier-muuntamalla signaalit.

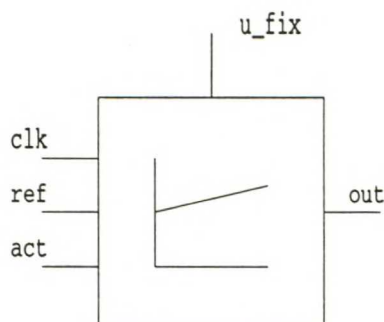
Laivaverkon simulointiin Saber soveltuu hyvin verrattuna muihin markkinoilla oleviin simulointiohjelmistoihin [15]. Sen laskentanopeus ei ole kovin suuri, mutta simuloitavan verkon mallinnus on havainnollista ja omien komponenttien luominen mahdollista, joten sillä voidaan kehittää monimutkaisiakin simulointimalleja tehokkaasti.

¹Saber[®] on kaupallinen simulointiohjelmisto, jonka oikeudet omistaa Analogy, Inc.

3.1.1 Simulointimallien luominen

Saberissa simulointimalli voidaan luoda joko kirjoittamalla piirin rakennetta vastaava ohjelma tekstieditorilla tai piirtämällä se graafisen ohjelman² avulla. Jälkimmäisessä tapauksessa ohjelma itse muodostaa piiriä kuvaavan tekstitiedoston. Käytännössä graafisen liittymän käyttö on niin paljon helpompaa, ettei tekstieditorin käyttöä kannata harkita. Saberin ohjelmakirjastoissa on valmiina noin 5000 komponentin malli ja niitä käyttäen mallinnettavan piirin luominen on hyvin helppoa. Käyttäjän tarvitsee ainoastaan liittää haluttu komponentti piiriin ja antaa komponentille sen tyypilliset parametrit. Komponenttikirjastot kattavat melko hyvin analogia- ja digitaalielektroniikassa yleisesti käytetyt komponentit. Sen sijaan sähkövoimateknisiä komponentteja kirjastoissa ei juurikaan ole. Esimerkiksi tahtimoottorin mallia ohjelmistossa ei ole valmiina. Tällaisissa tapauksissa käyttäjä voi tehdä komponentin mallin itse kirjoittamalla komponentin käyttäytymistä kuvaavan ohjelman MAST³-ohjelmointikielen avulla. Kun itse tehdyille komponentille vielä piirretään symboli erillisen symbolinluontiohjelman avulla, komponenttia voidaan käyttää simulointimalleissa samalla tavalla kuin ohjelmiston valmiitakin komponentteja.

MAST on erityisesti simulointitarkoituksiin kehitetty ohjelmointikieli. Se on yksi laajemman ns. AHDL-kielten (AHDL = Analog hardware description language) joukon kielistä [16]. Se muistuttaa ulkoasultaan C-kieltä, mutta sisältää tavanomaisten ohjelmarakenteiden lisäksi simuloinnissa tarpeellisia komentoja. Aiheen laajuuden takia tässä ei käsitellä kielen rakennetta tarkemmin, vaan viitataan teoksiin [16] ja [17]. Liitteessä A on esitetty esimerkkinä LCI-käytön välipiirivirran diskreetin PID-säätimen ohjelmakoodi. Säätimen malleissa käytettävä symboli on esitetty kuvassa 3.1. Säätimen sisäänmenosignaaleita ovat kello-



Kuva 3.1. LCI-käytön välipiirivirran diskreetin virtasäätimen symboli

naali `clk`, säädettävän suureen ohje- ja oloarvot `ref` ja `act` sekä mahdollinen myötäkytkentäsignaali `u_fix`. Ulostulosignaalina on säätimen lähtö `out`. Säätimelle voidaan antaa parametreja, joiden ansiosta säätimen käyttö erilaisissa

²Ohjelmiston graafinen mallinnusohjelma on DesignStar™

³MAST® on rekisteröity tavaramerkki. Sen oikeudet omistaa Analog, Inc

kohteissa on helppoa. Parametreja ovat esimerkiksi säätimen P-osan kerroin ja I-osan integrointiaika.

3.1.2 Hierarkia

MAST mahdollistaa modulaarisen ja hierarkisen mallin luomisen. Erilaisia loogisia kokonaisuuksia voidaan koota alemman tason elementeistä ja näitä kokonaisuuksia voidaan sitten kytkeä toisiinsa ylemmillä hierarkiatasoilla. Hierarkiatasojen määrää ei ole rajoitettu.

Hierarkia tarjoaa monia etuja simulointimallin luomiseen ja käyttöön. Suunnittelu selkeytyy, kun erilaiset osakokonaisuudet voidaan pitää erillään toisistaan ja suunnitella yksi kerrallaan. Suunnittelun alkuvaiheessa alemman tason moduulit voidaan yksityiskohtaisen mallin sijasta korvata toiminnallisilla malleilla, jolloin päätasen suunnittelu nopeutuu. Myöhemmin nämä toiminnalliset mallit voidaan korvata yksityiskohtaisilla malleilla. Tätä kutsutaan ylhäältä-alas-suunnitteluksi (engl. top-down design). Tällainen suunnittelu on selkeää ja nopeaa, koska yksityiskohtia tarvitsee alkaa miettiä vasta, kun kokonaisuus on jo hahmotettu. Menetelmä helpottaa myös ryhmätyöskentelyä laajojen mallien suunnittelussa, koska ryhmän kaikkien jäsenten ei välttämättä tarvitse tuntea mallin kaikkia osakokonaisuuksia yksityiskohtaisesti. Kerran luotujen mallien käyttäminen uudelleen joko samassa tai muissa simulointimalleissa myös nopeuttaa suunnittelua.

Suunnittelun helpottumisen lisäksi hierarkia nopeuttaa myös itse simulointia, kun malli on valmis. Saber muodostaa simuloinnissa ratkaistavan verkkomatriisin tavalla, joka ottaa hierarkian huomioon. Varsinkin laajoissa malleissa voidaan hierarkian ansiosta saavuttaa merkittäviä säästöjä muistitilan käytössä ja tietokoneajan kulutuksessa. [16][18]

3.2 Transienttianalyysistä

Transienttianalyysin avulla voidaan tutkia simuloitavan järjestelmän käyttäytymistä muutostilanteissa. Analyysi johtaa tasapainotilaan järjestelmän aikavakioista riippuvan ajan kuluttua. Analyysin tulokset kertovat järjestelmän käyttäytymisestä monipuolisesti, mutta haittapuolena analyysissä on laskennan raskaus ja sen seurauksena hitaus. Jos itse muutostila ei ole kiinnostuksen kohteena, voi tasapainotilan saavuttaminen transienttianalyysin tuloksena olla liian hidasta.

Sähkökäyttöjen simuloinnissa transienttianalyysi on erityisen raskas tehtävä,

koska toisaalta suuntaajien nopeat transientit edellyttävät lyhyen laskenta-askeleen käyttöä ja toisaalta pitkät mekaaniset aikavakiot vaativat pitkiä kokonais-simulointiaikoja. Laivakäytöissä mekaaniset aikavakiot voivat olla jopa minuutteja, jos laivan translatorinen liike otetaan huomioon. Kun tyristorien tilamuutoksiin kuluva aika on mikrosekuntien luokkaa, laskentapisteen lukumäärä saattaa kasvaa niin korkeaksi, että tietokoneen muistitila loppuu kesken. Esimerkiksi takateholaskelmia on hyvin hankala suorittaa ilman suuntaajalaitteiden kuvaamista yksinkertaisemmin. Yksinkertaistetuilla suuntaajamalleilla käytön dynamiikka ja esimerkiksi tehotasapaino saadaan laskettua oikein, mutta säröanalyysi saattaa antaa vääriä tuloksia.

Koska transienttianalyysi on laskennallisesti niin raskas, on kehitetty menetelmiä, joilla tasapainotila voidaan saavuttaa nopeammin [19]. Ekstrapolointimenetelmässä lähdetään liikkeelle DC-analyysin tuloksesta ja integroidaan järjestelmää muutamien jaksojen yli, minkä jälkeen arvioidaan tasapainotilan virhettä. Ratkaisua tarkennetaan iteroimalla, kunnes se on riittävän tarkka. Tämän jälkeen analyysia jatketaan integroimalla yhden jakson yli kerrallaan samalla tavalla, kunnes tasapainotila on löytynyt. Tällaiset menetelmät eivät ole saavuttaneet suurta suosiota kaupallisissa simulointiohjelmistoissa ja niitä on kehitetty lähinnä yliopistopohjaisissa ohjelmistoissa [20]. Tässä työssä ei ole käytetty mitään erityis-menetelmiä tasapainotilan saavuttamiseksi.

3.2.1 Transienttianalyysin erityispiirteitä Saberissa

Toisin kuin useimmat muut simulointiohjelmit Saber tallentaa transienttianalyysin päätteeksi automaattisesti järjestelmän dynaamisen tilan tiedostoon, josta se voidaan myöhemmin lukea alkuarvona seuraavaan simulointiin, joka alkaa siitä, mihin edellinen päättyi [20]. Tästä on etua, koska ei tarvitse etukäteen päättää, mihin asti simulointia suoritetaan. Saberin kuluttama muistitila on verrannollinen tulosten tarkastelua varten tallennettavien muuttujien lukumäärään. Kun transienttianalyysi suoritetaan paloittain, ensimmäisissä simuloinneissa ei tarvitse tallentaa kuin muutamia muuttujia, joiden avulla nähdään, toimiiko malli halutulla tavalla. Myöhemmissä ja mahdollisesti lyhyemmissä simuloinneissa voidaan sitten ottaa mukaan enemmän muuttujia, jotta mallin kaikkia kiinnostavia ominaisuuksia voidaan tarkastella. Tällainen menettely säästää merkittävästi muistitilaa ja myös nopeuttaa simulointia.

Saberissa on myös mahdollista muuttaa haluttujen solmupisteiden tai järjestelmän parametrien arvoja transienttianalyysin jälkeen ja aloittaa uusi analyysi näillä muutetuilla arvoilla siitä, mihin edellinen päättyi. Solmupisteille voidaan myös antaa nollasta tai DC-analyysin tuloksesta poikkeavia mielivaltaisia arvoja

jo ennen kuin ensimmäinen analyysi suoritetaan. Ongelmana on löytää mallista ne solmupisteet, joille on määrättävä alkuarvot mallin toiminnan varmistamiseksi ja laskea nämä arvot. Laajoissa malleissa voi olla useita satoja solmupisteitä, joista osa voi olla vielä digitaalisia. On selvää, että jo pelkkä kaikkien solmuarvojen syöttäminen tietokoneelle on hyvin työlästä eikä helpota simulointia verrattuna suoraviivaiseen transienttianalyysiin. Jos vain muutamien solmupisteiden arvot syötetään, on vaarana, ettei saatava transienttianalyysin aloitustila vastaa mitään fysikaalisesti mahdollista tilaa, jolloin pahimmassa tapauksessa koko laskenta saattaa epäonnistua.

3.2.2 Saber in numeerinen verkkoratkaisumenetelmä

Saberin verkkoratkaisumenetelmänä on parannettu solmupistemenetelmä. Sen etuna tavalliseen solmupistemenetelmään on, että sillä voidaan myös jännitelähteet kuvata suoraan muuttamatta niitä ensin ekvivalenttisiksi virtalähteen ja admittanssin rinnankytkennäksi.

Parannettu solmupistemenetelmä johtaa yleisessä tapauksessa epälineaaristen tavallisten differentiaaliyhtälöiden ryhmään, jonka ratkaisuna halutut solmupistejännitteet saadaan. Ratkaisun löytämiseksi simulaattori muuntaa aluksi differentiaaliyhtälöt epälineaaristen algebrallisten yhtälöiden ryhmäksi numeerisia integrointitekniikoita käyttäen. Valittavina integrointimenetelminä ovat trapetsimenetelmä ja Gearin 1. ja 2. asteen menetelmät. Epälineaarinen yhtälöryhmä linearisoidaan haluttua iterointimenetelmää käyttäen. Käytettävissä ovat Newton-Raphsonin ja Katzenelsonin menetelmät. Tuloksena saatava lineaarinen yhtälöryhmä ratkaistaan matriisitekniikoita, kuten LU-hajotelmaa, käyttäen.

Numeerisissa integrointimenetelmissä aika-askeleella on tärkeä merkitys. Ajatellaan esimerkkinä kapasitanssin yli olevan jännitteen ratkaisemista. Kapasitanssin virta on

$$i = C \frac{du}{dt}. \quad (3.1)$$

Jos jännite hetkellä t tunnetaan, jännite hetkellä $t + h$ on

$$u(t + h) = u(t) + \frac{1}{C} \int_t^{t+h} i(\tau) d\tau, \quad (3.2)$$

missä h on numeerisessa integroinnissa käytettävä aika-askel. Integraalia voidaan approksimoida monella tavalla. Esimerkiksi trapetsimenetelmän mukainen likiarvo on

$$\int_t^{t+h} i(\tau) d\tau \approx \frac{h}{2} [i(t) + i(t + h)], \quad (3.3)$$

jolloin differentiaaliyhtälön ratkaisuna saatavalle jännitteelle saadaan likimääräiseksi ratkaisuksi ajanhetkellä $t + h$

$$u(t + h) = u(t) + \frac{h}{2C} [i(t) + i(t + h)]. \quad (3.4)$$

Aika-askel voidaan valita kiinteäksi tai muuttuvaksi. Jos askel on kiinteä, Saber käyttää annettua aika-askeleen arvoa jokaisella askeleella. Jos askel valitaan muuttuvaksi, Saber käyttää annettua arvoa vain alkuarvauksena iteroinnille, jonka ratkaisuna lopullinen aika-askel saadaan.

Muuttuvan aika-askeleen käyttö nopeuttaa simulointia ja parantaa tarkkuutta useimmissa järjestelmissä. Vaikka askel valitaankin muuttuvaksi, sille voidaan silti antaa ala- ja yläraja, joiden välissä käytettävä askel joka tapauksessa on. Tällä tavoin voidaan kiinteän ja muuttuvan askeleen etuja yhdistää halutun tarkkuuden ja simulointinopeuden saavuttamiseksi.

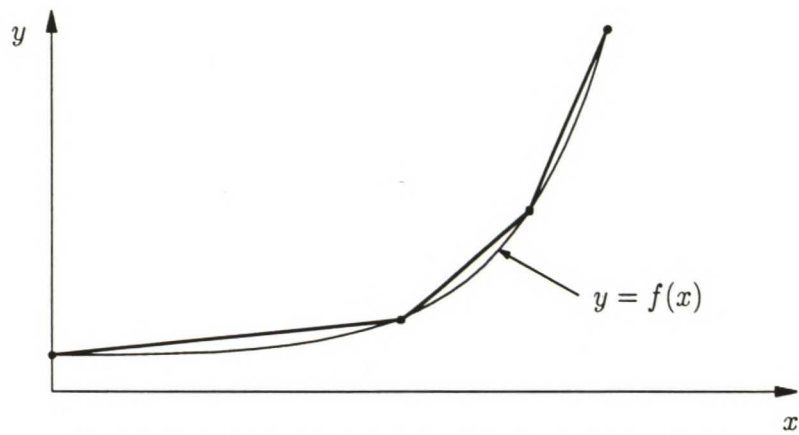
Saber iteroi ratkaisua predictor-corrector-algoritmia käyttäen, kunnes ratkaisu on riittävän tarkka eli annettujen rajojen sisäpuolella. Tarkkuutta mitataan Saberissa paikallisen pyöristysvirheen LTE avulla. Virheen laskemiseksi käytettävissä on erilaisia normeja. Esimerkiksi 1-normin L_1 mukaan laskettu pyöristysvirhe on

$$LTE_{L_1} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{u_i - u_{i+1}}{u_i} \right|, \quad (3.5)$$

missä alaindeksit osoittavat iteraatiokierrosta. Pyöristysvirhettä sanotaan paikalliseksi, koska se kokonaisvirheen sijasta ilmaisee vain yhden aika-askeleen pyöristysvirheen. Saberin käyttämät integrointimenetelmät ovat numeerisesti stabiileja, mikä tarkoittaa, että eri aika-askeleilla saatujen paikallisten pyöristysvirheiden summa eli kokonaisvirhe ei hajaannu [21].

3.2.3 Epälineaarisuudet Saberissa

Kaikki epälineaarisuudet Saberissa ovat paloittain lineaarisia. Kuvassa 3.2 on esitetty epälineaarinen yhden muuttujan funktio $y = f(x)$. Tämän funktion linearisointi paloittain suoritetaan muodostamalla janoja epälineaarisesta funktiosta otettujen näytepisteiden välille. Käyttäjä voi antaa näytepisteiden tiheyden simulointiparametrina tai itse ohjelmoitujen komponenttien tapauksessa myös ohjelmakoodissa. Ohjelmakoodissa voidaan myös määrätä tiettyjä pisteitä, joihin sijoitetaan aina näytepiste. Tällä tavalla voidaan hyvinkin epäsäännölliset epälineaariset funktiot linearisoida halutulla tarkkuudella.



Kuva 3.2. Epälineaarisen funktion linearisointi paloittain

Linearisoinnissa käytettävien algoritmien iteroinnit suppenevat kohti oikeaa ratkaisua vain, jos iteroinnin alkuarvaus on riittävän lähellä oikeaa tulosta. Iteraation hajaantumisen estämiseksi pisin sallittu iterointiaskel voidaan määrätä.

Tässä diplomityössä epälineaariset sähköiset komponentit, kuten muuntajat ja kuristimet, on mallinnettu lineaarisina. Sen sijaan säätöjärjestelmä sisältää myös epälineaarisia komponentteja.

Luku 4

LCI-käytön simulointimalli

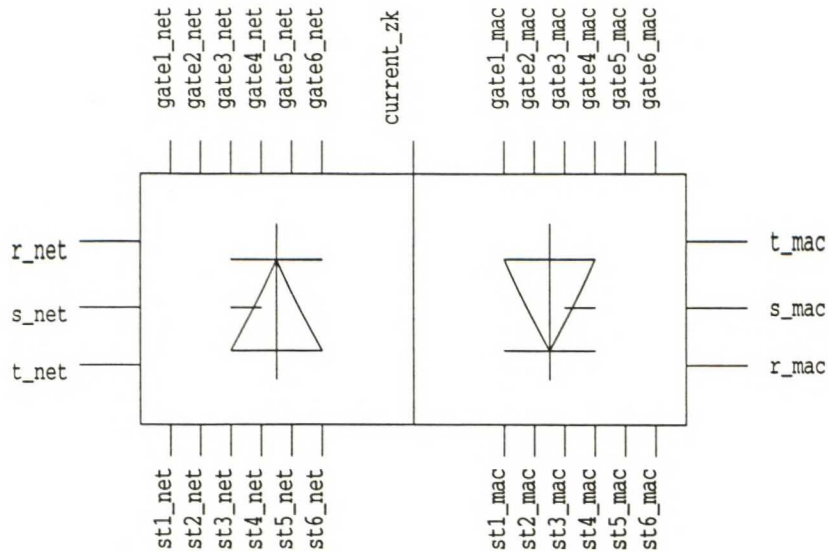
Tässä luvussa esitellään työssä kehitetyn LCI-käytön simulointimallin pääkomponenttien rakennetta ja toimintaa. Aluksi kappaleessa 4.1 selostetaan mallin osakokonaisuuksien rakennetta ja sitten kappaleessa 4.2 mallin säätöjärjestelmän komponenttien toimintaa. Lopuksi kappaleessa 4.3 selvitetään mallin tyristorien sytytyslogiikan toiminta. Mallin komponenttien ohjelmakoodeja ei käsitellä.

4.1 Mallin rakenne

Simulointimalli on rakennettu modulaariseksi, jolloin voidaan hyödyntää hierarkian tuomia etuja. Modulaarisuuden takia mallia on myös jatkossa helppo kehittää ja mallin komponenttien käyttö muissa malleissa on helppoa. Mallin pääkomponentteja ovat tahtimoottori, konekommutoitu suuntaaja, magnetointisilta, generaattorit ja muuntajat sekä säätö- ja ohjauspiirit.

4.1.1 Suuntaajan malli

Käytön kahdesta kuusipulssisillasta ja välipiirikuristimesta koostuva suuntaaja on mallinnettu yhdeksi alempia hierarkiatasoja sisältäväksi komponentiksi. Näin sen käyttäminen uusissa sovelluksissa on helppoa. Suuntaajan graafisessa mallinnusohjelmassa käytettävä symboli on kuvan 4.1 mukainen. Symbolin kytkentäpisteitä ovat suuntaajan molempien vaihtosähköpuolien vaiheet, välipiirivirran mitattu oloarvo ja siltojen tyristorien hilat sekä tyristorien tilaa ilmaisevat liittimet.



Kuva 4.1. LCI-käytön simulointiohjelmassa käytettävän suuntaajan malli

Symbolia vastaava malli sisältää seuraavalla hierarkiatasolla alaspäin verkko- ja konesillan, välipiirikuristimen ja välipiirivirran mittauksen. Sillat ovat identtiset ja edustavat mallia, jolla on oma symbolinsa ja joka sisältää sillan tyristorit RC -suojineen.

Tyristorina silloissa käytetään ABB Marinessa aiemmin kehitettyä MAST-kielistä mallia. Malli perustuu tyristorin kuvaamiseen ohjattavana resistanssina, jolla on neljä tilaa. Näitä ovat suuri ja pieni resistanssi sekä kasvava ja pienenevä resistanssi. Tyristorin mallia ja toimintaa on kuvattu tarkemmin viitteessä [22]. Ohjelmiston oma tyristorin malli on keskeneräinen eikä toimi kunnolla.

4.1.2 Moottorin malli

Tahtimoottorin simulointimalli perustuu kaksiakseliteorian mukaisiin kappaleissa 2.1.4 ja 2.1.5 esitettyihin yhtälöihin. Malli ratkaisee jokaisella laskenta-askeleella differentiaaliyhtälöryhmän, jonka muodostavat kolmivaiheisen koneen tapauksessa yhtälöt (2.2)–(2.7), (2.8) ja (2.31) sekä 2×3 -vaiheisen koneen tapauksessa yhtälöt (2.34)–(2.42), (2.8) ja (2.31).

Moottorimallissa roottorisuureet redusoidaan staattoriin, ennen kuin ne sijoitetaan ratkaistaviin yhtälöihin. Esimerkiksi napakäämivirran redusoinnissa lähtökohtana on, että staattoriin redusoitu napakäämivirta I_f' on sellainen, että kulkiessaan staattorissa redusoitu virta synnyttää ilmaväliin saman magneettijännitteen huippuarvon kuin todellinen napakäämivirta I_f synnyttää kulkiessaan roottori-

käämissä [3]. Redusoiduksi napakäämivirraksi saadaan

$$I'_f = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\xi_f N_f}{\xi_s N_s} I_f, \quad (4.1)$$

missä ξ_f on roottorin ja ξ_s staattorin käämityskerroin sekä N_f roottorin ja N_s staattorin käämikierrosluku. Kun moottorin toimintaa kuvaava yhtälöryhmä on ratkaistu, redusoidut roottorisuureet palautetaan jälleen todellisiksi suureiksi, minkä jälkeen niitä voidaan tarvittaessa tarkastella graafisesti.

Käytön avovesikäyrän mukainen neliöllinen vastamomentti on sisällytetty moottorimalliin. Ratkaisu on toimiva, mutta epälooginen. Moottori ja työkone, joka laivan tapauksessa on potkuri, ovat kaksi selkeästi toisistaan erotettavaa osakokonaisuutta. Jatkossa on tärkeää ohjelmoida malliin mekaaninen liityntäkohta, johon voidaan yksinkertaisesti kiinnittää myös muuntotyypisiä kuormia.

4.1.3 Generaattorit ja muuntajat

Simulointimallissa generaattorit on kuvattu ideaalisen jännitelähteen ja kompleksisen impedanssin sarjakytkentänä. Impedanssin arvo on määrätty verkon oikosulkutehon ja generaattoreiden tyypillisen staattoriresistanssin avulla. Jännitelähteen arvo on laskettu sellaiseksi, että nimelliskuormalla pääkiskoston jännite on nimellinen. Tämä on riittävää tutkittaessa käytön ominaisuuksia normaalissa toiminnassa, mutta vikatilanteiden tarkemmassa selvittelyssä ja mm. takateholaskelmissa generaattoreiden mallintaminen kaksiakseliteoriaan perustuvan konemallin avulla on tarpeen.

Muuntajat kuvattu ABB Marinessa kehitetyn lineaarisen muuntajamallin avulla. Malli ei ota kyllästyksen vaikutusta huomioon. Tässä työssä tehtyihin simulointeihin lineaarinen malli on riittävä, mutta haluttaessa esimerkiksi selvittää muuntajien kytkentävirtasysäysten vaikutuksia kyllästys on otettava huomioon. Muuntajan malli on, kuten todellinenkin muuntaja, sellainen, että ensiö- ja toisiopuolilla ei ole galvaanista yhteyttä. Simuloinnissa tämä aiheuttaa numeerisia ongelmia solmupistejännitteiden määrittämisessä, koska verkkomatriisista tulee lähes singulaarinen. Ongelma on ratkaistu kytkemällä pääpiiriin maadoitusresistansseja ja -kapasitansseja. Resistanssien arvot ovat hyvin suuria ja kapasitanssien arvot hyvin pieniä, joten komponentit ainoastaan auttavat laskenta-algoritmeja löytämään ratkaisun, mutta eivät vaikuta merkittävästi tulosten tarkkuuteen. Resistansseille ja kapasitansseille on myös fysikaalinen vastine todellisissa järjestelmissä, sillä niissäkin esiintyy aina vuotokonduktansseja ja maakapasitansseja.

4.2 Säädön malli

Käytön säätöjärjestelmä on digitaalinen ja sen toiminta perustuu suhteellisarvoilla laskemiseen. Suhteellisarvojen ansiosta säätöparametrien vaihtelualue on kapea, vaikka eri käyttöjen absoluuttiset arvot voivat poiketa paljonkin toisistaan. Näin esimerkiksi eri tehoisten käyttöjen säädön viritys helppoa, kun yhden käytön parametreille on löydetty sopivat arvot. Todellisissa säätöjärjestelmissä liukulukujen esitystarkkuus voi vaatia säädön toteuttamista suhteellisarvoilla.

4.2.1 Digitaalinen PID-säädin

Normaalin analogisen PID-säätimen ulostulo on

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(s) ds + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (4.2)$$

missä $e(t)$ on erosuure, joka määrittää prosessin ohjearvon ja oloarvon erotuksena. K_P , K_I ja K_D ovat säätimen P-, I- ja D-osien kertoimet vastaavasti. Approksimoimalla integraalia summalla ja derivaattaa differenssillä saadaan diskreetin PID-säätimen ulostuloksi

$$u(t) = K_P e(t) + K_I T_s \sum_{j=0}^{t/T_s} e(jT_s) + \frac{K_D}{T_s} [e(t) - e(t - T_s)], \quad (4.3)$$

missä T_s on säätimen näytteenottoväli.

Liitteessä A on esimerkki digitaalisesta PID-säätimestä toteutettuna MAST-ohjelmointikielellä.

4.2.2 Suodatuksesta

Monia säätöjärjestelmän suureita alipäästösuodatetaan. Esimerkiksi kaikki mitaustulokset suodatetaan, jolloin korkeataajuuksien häiriökomponenttien vaikutusta saadaan pienemmäksi. Suodattimet ovat ensimmäistä astetta. Merkitään suodattimen suodatusaikavakiota symbolilla τ .

Analogisen suureen $u(t)$ suodatustulos $u_{\text{filt}}(t)$ toteuttaa differentiaaliyhtälön

$$\tau \frac{d[u_{\text{filt}}(t)]}{dt} + u_{\text{filt}}(t) = u(t), \quad (4.4)$$

josta suodatustulokseksi ratkeaa

$$u_{\text{filt}}(t) = u(t) (1 - e^{-t/\tau}). \quad (4.5)$$

Diskreetin suodattimen suodatustulos saadaan suodatettavan suureen viimeistä edellisellä ja viimeisellä kellojaksolla olleiden arvojen u_{k-1} ja u_k parametreilla θ_1 ja θ_2 painotettuna summana

$$u_{\text{filt},k} = \theta_1 u_{k-1} + \theta_2 u_k. \quad (4.6)$$

Parametrit θ_1 ja θ_2 lasketaan näytteenottovälin T_s ja suodatusaikavakion τ avulla

$$\theta_1 = \frac{\tau}{\tau + T_s} \quad (4.7)$$

$$\theta_2 = \frac{T_s}{\tau + T_s}. \quad (4.8)$$

Ensimmäisen asteen suodatus aiheuttaa aina vaihesiirtoa suodattimen tulo- ja lähtösuureiden välille. Vaihesiirto voi pahimmassa tapauksessa saada säätöjärjestelmän värähtelemään. Diskreetin suodattimen tapauksessa vaihesiiron kompensointi on suhteellisen helppoa, mutta analogisessa suodatuksessa se on hankalampaa. Yksinkertaisinta on pitää suodatusaikavakio niin lyhyenä, ettei vaihesiirto varmasti saa järjestelmää värähtelemään.

4.2.3 Säätimien ulostulon rajoitus ja anti-wind-up

Käytännössä summatermi kaavassa (4.3) voi aiheuttaa ongelmia, sillä erosuureen ollessa riittävän kauan samanmerkkinen säätimen ulostulo voi kasvaa itseisarvoltaan niin suureksi, ettei sitä kyetä toteuttamaan. Ongelma voidaan välttää rajoittamalla säätimen ulostulo $u(t)$ realistiselle välille $u_{\text{raj}}(t) \in [u_{\text{min}}, u_{\text{max}}]$. Säätimen rajoitettu ulostulo on

$$u_{\text{raj}}(t) = \begin{cases} u_{\text{min}}, & \text{jos } u(t) < u_{\text{min}} \\ u_{\text{max}}, & \text{jos } u(t) > u_{\text{max}} \\ u(t), & \text{muuten} \end{cases} \quad (4.9)$$

Pelkkä tällainen rajoitus ei ole riittävä, koska erosuureen vaihtaessa merkkiä lähdön itseisarvo ei ala heti pudota, vaan pysyy rajoitetussa arvossaan, kunnes summatermin itseisarvo on pudonnut riittävän pieneksi. Säätimeen on tästä syystä lisätty myös summatermin rajoitus, ns. anti-wind-up, joka estää summatermin itseisarvon kasvun parametrina annettavaa rajaa korkeammalle. Näin summatermin takia rajoitettu lähtö palaa kaavan (4.9) määäämien raja-arvojen sisään heti erosuureen merkin muuttuessa.

4.2.4 Vuon säätö

Tahtimoottoria käynnistettäessä kone tulee magnetoida, ennen kuin staattorivaiheisiin kytketään jännite. Moottori magnetoidaan kytkemällä roottorikäimitykseen jännite ja ohjaamalla tämän jälkeen käämin virta tyhjäkäyntimagnetointia vastaavaan arvoon. Koneen vuon noustua riittävän lähelle ohjearvoaan staattorista voidaan alkaa syöttää momenttiohjeen mukaista virtaa koneeseen.

Tyypillisesti suuritehoisten LCI-käyttöjen tahtimoottoreissa käytetään harjatonta magnetointia. Tässä työssä harjatonta magnetointia ei ole mallinnettu, vaan napakäämivirta syötetään pääkiskostosta muuntajan ja kuusipulssisen tyristorisillan välityksellä samalla tavalla kuin liukurenkailla varustetuissa tahtikoneissa.

Vuosäätimen tehtävänä on säätää napakäämivirtaa siten, että moottorin ilmaläivuo Ψ_δ pysyy halutussa arvossa. Vakiovualueella vuo pidetään vakiona ja kentänheikennysalueella sitä pienennetään kääntäen verrannollisena nopeuteen. Suhteellisarvona vuon tulee olla

$$\psi_\delta = \begin{cases} \frac{1}{\gamma}, & \text{kun } \omega \leq \gamma \\ \frac{1}{\omega}, & \text{kun } \omega > \gamma, \end{cases} \quad (4.10)$$

missä γ on käytön kentänheikennyspiste.

Vuosäätimen tulosuureina ovat moottorin nopeus ja vuon oloarvo sekä lähtösuurena magnetointisillan sytytyskulmaohje.

Vuon oloarvon määrittämiseksi täytyy tuntea vaimennuskäämivirrat. Viitteiden [23] ja [24] mukaisesti vaimennuskäämivirroiksi saadaan

$$i_D = \frac{L_{md}}{L_D} (i_d + i_f) \left(-1 + \frac{1}{1 + s\tau_D} \right) \quad (4.11)$$

$$i_Q = \frac{L_{mq}}{L_Q} i_q \left(-1 + \frac{1}{1 + s\tau_Q} \right). \quad (4.12)$$

Kaavoissa τ_D on vaimennuskäämin pitkittäinen ja τ_Q poikittainen aikavakio.

Todellisessa koneessa pitkittäisen vaimennuskäämin ja napakäämin välinen keskinäisinduktanssi poikkeaa muista pitkittäisakselin keskinäisinduktansseista. Vaimennuskäämivirtojen laskennassa tätä poikkeamaa ei oteta huomioon, koska väliinduktanssia ei ole mallinnettu myöskään simulointimallin tahtimoottoriin.

Vaimennuskäämivirrat diskretoidaan viitteen [22] mukaisesti taaksepäin suora-kaide -menetelmällä, minkä jälkeen tahtimoottorin vuot pitkittäis- ja poikkittais-akselien suunnilla voidaan laskea kaavoista

$$\Psi_d = L_{s\sigma} i_d + L_{md} (i_d + i_f + i_D) \quad (4.13)$$

$$\Psi_q = L_{s\sigma} i_q + L_{mq} (i_q + i_Q). \quad (4.14)$$

Pitkittäisen ja poikkittaisen komponentin avulla ilmapäälivun itseisarvo on

$$|\Psi_\delta| = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2} \quad (4.15)$$

ja kulma d -akseliin nähden eli napakulma

$$\delta = \arctan \frac{\Psi_q}{\Psi_d}. \quad (4.16)$$

Vuon ohjearvo määritetään nopeuden perusteella kaavan (4.10) avulla. Käynnistyksessä vuon ohjearvoa ei nosteta nolasta tyhjäkäyntimagnetointia vastaavaan arvoon askelmaisesti, vaan lineaarisesti tietyn ajan kuluessa. Lisäksi säätimen erosuuretta kerrotaan alussa tietyllä aikavälillä ajan funktiona lineaarisesti nolasta yhteen kasvavalla luvulla. Nämä rajoitukset rauhoittavat säätimen lähtösuureen käyttäytymistä magnetoinnin alussa, mutta eivät vaikuta säädön toimintaan muuten.

Säätimen lähtö u_ψ noudattaa pieniä muutoksia lukuunottamatta kaavan (4.3) mukaista yleisen diskreetin PID-säätimen lähtön lauseketta. Derivointitermi on asetettu nolaksi, joten säädin on PI-säädin. Lähtöä suodatetaan digitaalisesti kaavoihin (4.6)–(4.8) perustuen. Lisäksi säätimen lähtö on rajoitettu välille $[-1, 1]$, jossa 1 vastaa magnetointisillan sytytyskulmaa 0° ja -1 kulmaa 180° . Sillan kippaamisen estämiseksi sytytyspulssilogiikka rajoittaa vielä suurimman sytytyskulman pienemmäksi kuin 180° , mutta rajoitusta ei käytännössä tarvita juuri koskaan.

Roottoripiirin aikavakio on pitkä ja siten virran nousu tyhjäkäyntimagnetointia vastaavaan arvoon kestää kauan. Tänä aikana kaavan (4.3) summatermi kasvaa suhteellisen suureen arvoon ja perinteisesti säätimen integrointiaika on asetettava pitkäksi, jotta vasteen ylitys saadaan pidettyä kurissa. Pitkä integrointiaika saa kuitenkin vasteen muistuttamaan puhtaan suhdesäätimen vastetta eikä säätötulosta voida pitää kovin hyvänä. Parempi tapa on rajoittaa säätimen integrointiosan arvo ennalta määrättyyn maksimiin ja käyttää kappaleessa 4.2.3 kuvattua anti-wind-up:ia, jolloin säätö suurissa oloarvon muutoksissa toimii lähes puhtaan P-säätimen tavoin ja pienissä normaalin PI-säätimen tapaan. Normaalisti moottorin vuota ei LCI-käytössä ole tarkoitus muuttaa kovin nopeasti, joten säätimen

parametrit voidaan asetella siten, että säätö korjaa pienet muutokset mahdollisimman nopeasti. Vieläkin parempaan vasteeseen päästään, kun säätimen integrointiosa kytketään kokonaan pois magnetoinnin ajaksi ja päälle vasta, kun koneen vuon oloarvo vastaa tyhjäkäyntimagnetointia. Tällöin vuon nousu saadaan hyvin nopeaksi eikä vasteeseen synny ylitystä juuri lainkaan.

4.2.5 Välipiirivirran säätö

Moottorin momentin suunta määräytyy konesillan sytytysjärjestyksen perusteella ja sen suuruutta säädetään välipiirivirran avulla.

Välipiirivirran oloarvo mitataan ja suodatetaan ensimmäisen asteen analogisella alipäästösuodattimella, minkä jälkeen virta diskretoidaan ottamalla siitä näytteitä 2 kHz näytteenottotaajuudella. Diskretoitu virta on virtasäätimen tulosuure, jota säädetään nopeussäätimen lähdöstä saatavaan ohjearvoon.

Virtasäädin on vuosäätimen tapaan yleinen PID-säätäjä pienin muutoksin. Moottorin vaihevirta muodostuu välipiirivirran I_{DC} korkuisista 'palkeista' kuvan 2.12 tapaan. Jos kommutointia ei oteta huomioon, virran perusaallon tehollisarvo on

$$I_{1,eff} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} I_{DC} \cos x \, dx = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{DC}. \quad (4.17)$$

Tämä on yhtä suuri kuin moottorin nimellisvirta I_n , joten välipiirivirran maksimiarvo on rajoitettu kaavan

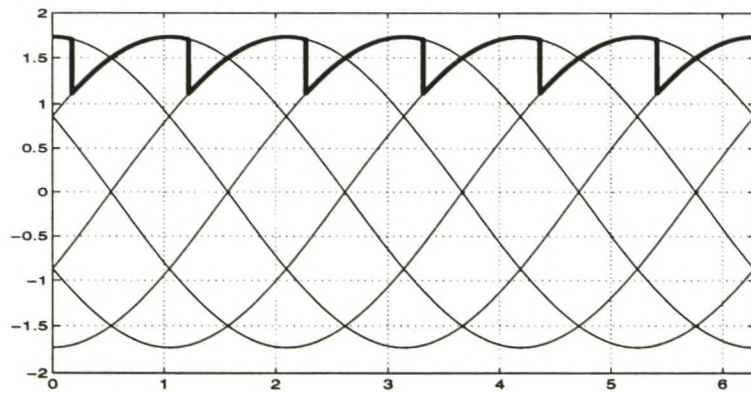
$$I_{DC,max} = \frac{\sqrt{6}}{2} I_n \approx 1.2 I_n \quad (4.18)$$

mukaiseen arvoon. Välipiirivirran rajoitus rajoittaa samalla myös moottorista saatavaa momenttia. Säätimessä on myös kappaleen 4.2.3 mukainen anti-wind-up.

4.2.6 Myötäkytkentä moottorin pyörimisnopeudesta

Välipiirikuristimen virta määräytyy verkkosillan tasajännitteen ja moottorin liikejännitteen perusteella, jos moottorin staattorin resistanssin ja hajainduktanssin vaikutusta ei oteta huomioon. Moottorin kehittämä liikejännite on verrannollinen moottorin pyörimisnopeuteen, joten verkkosillalta vaadittava lähtöjännite riippuu moottorin pyörimisnopeudesta. Varsinkin pienillä nopeuksilla muutostilanteissa moottorin nopeus voi muuttua yhden tyristoriparin johtoaikana paljonkin verrattuna nopeuden absoluuttiseen arvoon. Esimerkiksi moottoria kiihdytettäessä

liikejännite nousee ja välipiirin virta pyrkii pienenemään. Vakionopeudella ajettaessa moottorin liikejännite ei muutu, mutta välipiiristä näkyvä moottorin liikejännitteen hetkellisarvo silti muuttuu. Liikejännite on kolmivaiheinen sinimuotoinen suure ja välipiiristä katsottuna liikejännitteestä näkyy yhden pääjännitteen hetkellisarvo. Kutsutaan tätä pääjännitettä tässä moottorin vastajännitteeksi. Vastajännite muuttuu kommutoinnin aikana. Esimerkiksi tyristorien 1 ja 6 johtaessa välipiirin konesillan puoleinen jännite on $u_{DC} = -u_{rs}$. Kun virta on kommutoinut tyristorilta 6 tyristorille 2, jännite on $u_{DC} = u_{tr}$. Mikäli konesillan sytytyskulma poikkeaa ideaalisesta arvosta $\alpha_{II} = 180$ sähköastetta, kuten käytännössä aina tapahtuu, vastajännite on epäjatkuva, sillä se hyppää kommutoinnissa liikejännitteen pääjännitteeltä toiselle. Nollasta poikkeavan kommutointiajan takia vastajännite on jatkuva, mutta käytännössäkin jännitteen hyppäys on varsin suuri ja äkillinen ja sitä suurempi, mitä enemmän konesillan ohjauskulma poikkeaa 180 sähköasteesta. Kuvassa 4.2 on esitetty moottorin vastajännite eräällä aikavälillä, kun kommutointiaika oletetaan nolllaksi.



Kuva 4.2. Moottorin vastajännite

Välipiirivirta pyritään pitämään ohjearvossaan PI-säätimen avulla. Moottorin vastajännitteessä tapahtuvat muutokset muuttavat välipiirikuristimen yli olevaa jännitettä, mikäli verkkosillan lähtöjännitettä ei samanaikaisesti muuteta. Kuristimen yli olevan jännitteen muutokset pyrkivät muuttamaan välipiirin virtaa, joten moottorin vastajännitteen aiheuttamat välipiirivirran muutokset on kompensoitava verkkosillan lähtöjännitettä muuttamalla. Tästä syystä välipiirivirran säätimeen on toteutettu myötäkytkentä. Näin säätimen P- ja I-osien kertoimet voidaan virittää korjaamaan muista syistä kuin vastajännitteen muutoksista johtuvia säätöpoikkeamia.

Myötäkytkentäsignaali koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen osa on verrannollinen moottorin vastajännitteen hetkellisarvoon u_s ja toinen osa verrannollinen liikejännitteen pyörimisnopeutta vastaavaan keskiarvoon U_d .

Kun vuon suuruus ja suunta sekä moottorin pyörimisnopeus tunnetaan, liikejännitteiden hetkellisarvot voidaan laskea vaihetasolla. Vaihejännitteistä valitaan johtavien tyristorien mukaisesti kaksi, joiden erotuksena moottorin vastajännitteen hetkellisarvo u_δ muodostuu. Vaihejännitteet voitaisiin myös mitata moottorin liittimistä, mutta liitinjännitteiden säröytyneisyyden takia niitä tulisi suodattaa, jolloin suodattimien vaihesiirto aiheuttaisi ongelmia. Liikejännitteen keskiarvo lasketaan moottorin kulmanopeuden ja konesillan sytytyskulman avulla normaalin kuusipulssisillan lähtöjännitteen kaavan

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_p \left[\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu) \right], \quad (4.19)$$

avulla, mutta tässä on muistettava, että sillan vaihtojännitepuolen pääjännitteen tehollisarvo U_p riippuu moottorin pyörimisnopeudesta. Kun vuon kierto-osoitin Ψ_δ tunnetaan, U_p voidaan laskea kaavasta

$$U_p = \frac{\sqrt{6}}{2} \omega_m |\Psi_\delta|, \quad (4.20)$$

missä ω_m on moottorin sähköinen kulmanopeus.

Jännitteiden u_δ ja U_d erotus

$$u_{\text{ero}} = u_\delta - U_d \quad (4.21)$$

muodostaa myötäkytkentäsignaalin ensimmäisen osan. Toinen osa on liikejännitteen keskiarvo ja myötäkytkentäsignaali u_{vasta} kokonaisuudessaan näiden kahden sopivilla kertoimilla m ja n kerrottu summa

$$u_{\text{vasta}} = m u_{\text{ero}} + n U_d. \quad (4.22)$$

Tämä signaali lisätään myötäkytkentäsignaalina välipiirivirran säätimen lähtöön.

Välipiirin jännitteen hetkellisarvo on jatkuvassa muutostilassa myös verkkosillan puolella. Syyt ovat periaatteessa samat kuin konesillan puolella. Välipiirikuristimen ylitse vaikuttava jännite on näin ollen käyrämuodoltaan varsin monimutkainen ja siten välipiirivirran pitäminen ohjearvossaan hankala tehtävä. Välipiirikuristin kuitenkin tasoittaa induktiivisena komponenttina virtaa ja helpottaa säätöä. Verkkosillan aiheuttaman jännitteenheilahtelun eliminointi on periaatteessakin vaikeaa, sillä juuri sama jännite on pääasiallinen välipiirivirtaa ajava voima. Jotta verkkosillan lähtöjännitteen hetkellisarvon muutoksista johtuvat virran oloarvon muutokset voitaisiin eliminoida, tulisi verkkojännitettä voida säätää omia luonteenomaisia rajoituksiaan, kuten pisimmillään kuudesosajakson mitausta viivettä, nopeammin, mikä on ajatuksenakin ristiriitainen.

Pyörimisnopeuden kasvaessa moottorin syöttötaajuus lähestyy syöttöverkon taaajuutta ja myötäkytkentäsignaalin ensimmäisen osan tuoma hyöty pienenee lähinnä erilaisten mittausten ja vuon laskennan aiheuttamien viiveiden takia. Tästä

syystä ensimmäisen osan kerroin m ei ole vakio, vaan se muodostetaan pyörimisnopeuden mukaan siten, että suurilla nopeuksilla se on nolla. Keskimääräiseen liikejännitteeseen U_d perustuva osa myötäkytkentäsignaalista sen sijaan vaikuttaa myös suurilla nopeuksilla.

4.2.7 Pyörimisnopeuden säätö

Uloimpana säätöpiirin säätösilmukkana on nopeussäätö. Nopeussäädin on diskreetti PID-säädin, jonka lähtöön on lisätty myötäkytkentähaara. Myötäkytkentä ottaa huomioon vastamomentista aiheutuvan tunnetun momenttitarpeen siten, että varsinaisen säätimen tehtäväksi jää tarkan säädön toteuttaminen. Näin säädin voidaan virittää nopeammaksi ja tarkemmaksi kuin ilman myötäkytkentää. Myötäkytkentäsignaali on

$$f = n\omega_m^2, \quad (4.23)$$

missä n on kerroin, jolla signaalin vaikutusta lähdön voidaan painottaa.

Säätimen lähdön derivoiva osa ottaa huomioon käytön hitausmassojen nopeusmuutoksissa tarvittavan momentin. Nopeissa kiihdytyksissä tämä momenttitarve voi olla varsin suuri verrattuna vastamomentista aiheutuvaan momenttitarpeeseen. Tällaista säätöä ei todellisissa laivakäytöissä tarvita, sillä kiihdytysrampit ovat joka tapauksessa loivia ja derivointitermin vaikutus jäisi kovin pieneksi. Syy rauhallisiin kiihdytyksiin on pääasiassa laivan dieselveimälaitos. Dieselmootto-
reiden tehoa ei voida nostaa niin nopeasti kuin sähkökäyttö muuten sallisi, ja yritettäessä kiihdyttää potkuria liian nopeasti laivan voimalaitoksesta loppuu teho. Toisaalta laivan hyvin suuren massan kiihdyttäminen ei onnistuisi kovin nopeasti, vaikka käytön potkuri sinänsä pyörisikin nopeasti. Lisäksi potkurin nopeat pyörimisnopeuden muutokset voivat aiheuttaa kavitointia, jolloin potkurin työntövoima pienenee jyrkästi. Simulointimallissa kiihdytysajat ovat huomattavasti todellisia käyttöjä lyhyempiä pitkien tietokoneaikojen takia. Tästä syystä mallin nopeussäätimen derivoivalle osalle on asetettu nollasta poikkeava arvo. Se voidaan määrätä esimerkiksi suurinta kiihdytysohjetta vastaavana lisäyksenä säätimen lähtöön.

Pysyvässä tilassa nopeuden derivaatta on nolla. Myötäkytkentäsignaalin kertoimeksi voidaan valita esimerkiksi $n = 0,8$ p.u., jolloin pysyvässä tilassa nopeuden ollessa nimellinen myötäkytkentäsignaali on $f = 0,8$. Koska nopeussäätimen maksimilähtöarvo on yksi, jää PID-säätimen hoidettavaksi näin 20 % lähdöstä.

4.3 Tyristorien sytytyslogiikka

Kuusipulssisiltojen tyristorien on ehdottomasti saatava sytytyspulssit oikeaan aikaan. Simulointimallissa pulssien ajoitus perustuu loogisiin funktioihin, koska koko käytön toiminnan kannalta pulsseja muodostavan elektronikan mallinnus ei ole oleellista ja se hidastaisi simulointia tarpeettomasti. Toiminnallisesti loogisiin funktioihin perustuva malli vastaa todellista sytytyslogiikkaa.

4.3.1 Magnetointisilta ja verkkosilta

Magnetointisillan ja verkkosillan sytytyslogiikat ovat samanlaiset. Magnetointisilta saa sytytyskulmaohjeen vuosäätimeltä ja verkkosilta välipiirivirran säätimeltä. Logiikka muodostaa syöttöverkkoon tahdistettuja saha-aaltoja yhden kutakin sillan tyristoria kohti ja vertaa niitä sytytyskulmaohjeeseen. Sahapulssien arvo on yksi puolet verkon jaksonajasta ja laskee sitten lineaarisesti miinus yhteen toisen puolijakson aikana noustakseen jakson päätyttyä äkillisesti takaisin yhteen. Halutun sytytyskulman perusteella muodostetaan lisäksi 'tasoaalto', jonka suuruus on välillä $-1 < v_{\text{ref}} < 1$, missä 1 vastaa sytytyskulmaa 0° ja -1 kulmaa 180° . Sytytyshetket saadaan tämän tasoaallon ja sahapulssien laskevien reunojen risteyskohdista. Kuvan 4.3 yläosassa on kahden peräkkäin sytytettävän tyristorin saha-aallot ja sytytyskulmaa $\alpha = 45^\circ$ vastaava sytytyskulmaohje v_{ref} . Kun saha-aallon laskeva osa leikkaa ohjeen, logiikka antaa kyseistä saha-aaltoa vastaavalle tyristorille hilapulssin.

Sillassa tulee jatkuvan virran alueella aina kahden tyristorin johtaa yhtäaikaan, mutta aukottuvan virran alueella ne voivat molemmat sammua johtoalueessaan. Tämän takia logiikka antaa hilapulsseja pareittain siten, että molemmat johtaviksi tarkoitetut tyristorit saavat pulssin, vaikka jatkuvan virran alueella toinen niistä jo johtaakin.

4.3.2 Konesilta

Konesillan tyristorien sytytyspulssilogiikka jakautuu kahteen toisistaan poikkeavaan osakokonaisuuteen. Suurilla nopeuksilla luonnollisen kommutoinnin ollessa mahdollinen pulssien ajoitus on vastaavanlainen kuin magnetointi ja verkkosiltojenkin tapauksessa. Erot liittyvät sillan vaihtojännitepuolen taajuuteen, joka moottorin puolella ei ole vakio, vaan riippuu moottorin pyörimisnopeudesta.

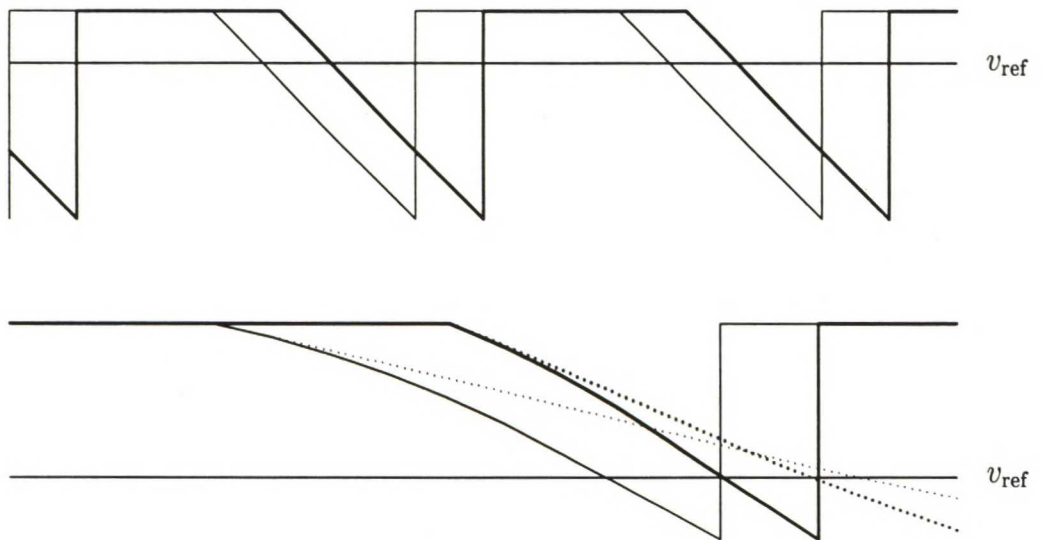
Syklokonvertterikäytössä kuusipulssisiltojen tyristoreille annettavien hilapulssien

paikat määräytyvät taso-saha-aalto -vertailun tuloksena samaan tapaan kuin LCI-käytön magnetointi- ja verkkosilloissakin. Saha-aallot on tahdistettu vakiona pysyvään verkkotaajuuteen. LCI-käytössä saha-aaltojen muodostaminen tällä tavalla ei ole mahdollista, koska moottorin taajuus ei ole vakio. Aaltojen laskevat osat eivät enää voi olla suoria, vaan niiden tulee muodostua kulmanopeuden integraalifunktiona. Ajan funktiona ne ovat

$$s(t) = 1 - \int_{t_0}^t \omega_m(t) dt, \quad (4.24)$$

missä $s(t)$ on saha-aallon laskeva osa, t_0 hetki, jolloin aallon laskeva osa alkaa ja $\omega_m(t)$ moottorin kulmanopeus skaalattuna siten, että $s(t) = -1$ hetkellä, jolloin saha-aalto muuttuu takaisin arvoon yksi.

Kuvan 4.3 alaosassa on esitetty kahden peräkkäin sytytettävän tyristorin saha-aallot ajotilanteessa, jossa moottorin nopeus kasvaa, ja sytytyskulmaa $\alpha = 150^\circ$ vastaava sytytysohje v_{ref} . Aaltojen laskevat osat kaartuvat alaspäin ja kaartumi-



Kuva 4.3. Modifioitu taso-kolmiovertailu

nen on sitä voimakkaampaa, mitä suurempi on moottorin nopeuden suhteellinen muutosnopeus. Kuvaan on piirretty pisteviivoilla saha-aallot siinä tapauksessa, että ne olisivat laskevia suoria, jonka kulmakerroin määrättäisiin laskevan osan alkuhetkellä vallitsevan nopeuden mukaan. Nähdään, että tällä tavalla menetellessä hilapulssit annettaisiin aivan liian myöhään ja tässä tapauksessa lisäksi väärässä järjestyksessä.

Pienillä nopeuksilla konesillan kommutointi perustuu pulssimaiseen välipiirivirtaan. Sytytyspulssien paikat määräytyvät kappaleessa 2.2.3 esitetyllä tavalla moottorin vuon, pyörimissuunnan ja toimintakvadrantin perusteella. Sytytyslogiikka

poistaa sytytyspulssit johtavalta tyristoriparilta, kun vuon ja a-vaiheen käämin magneettiakselin välinen kulma on parametrina d annettavan määrän verran vähemmän kuin taulukossa 2.2 sivulla 34 ilmoitetut sytytyshetkiä vastaavat kulmat. Samanaikaisesti verkkosilta ohjataan vaihtosuuntausalueelle ja välipiirin virta alkaa laskea. Logiikka tutkii konesillan tyristorien tilaa ja kaikkien tyristorien sammuttua ja toipumisajan kuluttua uudelle tyristoriparille annetaan hilapulsseja taulukkojen 2.1 ja 2.2 mukaisesti. Parametrin d tarkoituksena on ottaa huomioon välipiirivirran pienentämiseen vaadittava aika. Ilman sen käyttöä pienillä nopeuksilla saatava momentti olisi pienempi ja esimerkiksi käynnistys kestäisi kauemmin kuin parametria käytettäessä.

Toimintakvadrantin valinta perustuu moottorin momenttitapeeseen, joka on pysyvässä tilassa verrannollinen nopeuden neliöön. Logiikka vertaa nopeuden oloarvoa ohjearvoon ja päättää vertailun perusteella kvadrantin. Normaalisti käyttö toimii moottorina, mutta nopeuden itseisarvon kasvaessa liian suureksi ohjeen itseisarvoon verrattuna, käyttö siirtyy toimimaan generaattorina ja alkaa syöttää tehoa verkkoon. Tällainen tilanne esiintyy esimerkiksi suunnanvaihdossa, jossa käyttöä on jarrutettava. Jotta käyttö ei alkaisi värähdellä kahden eri kvadrantin välillä, logiikkaan on lisätty hystereesi, jonka ansiosta kvadrantista toiseen siirtyminen tapahtuu eri suuntiin siirryttäessä eri kohdissa.

Siirtyminen kvadrantista toiseen tapahtuu pienillä nopeuksilla yksinkertaisesti sytyttämällä taulukkojen 2.1 ja 2.2 mukaisesti kvadrantin mukainen tyristoripari. Suurilla nopeuksilla siirtyminen generaattorikäyttöön tapahtuu pienentämällä konesillan sytytyskulma tasasuuntausalueelle ja siirtyminen moottorikäyttöön nostamalla se vaihtosuuntausalueelle. Sytytyskulman muutoksia on mallissa alipäästösuodatettu, jotta muutokset eivät olisi liian nopeita. Kulman pienentäminen voidaan tehdä nopeasti, mutta suurentamiselle on varattava aikaa, ettei samalla kommutoivan pääjännitteen puolijaksolla sytytetäisi samaa tyristoriparia kahdesti [25]. Verkkosillan sytytyskulmaa muutetaan molemmilla nopeusalueilla kvadrantin mukaisesti; moottorina tasasuuntausalueelle ja generaattorina vaihtosuuntausalueelle.

Luku 5

Simulointituloksia ja tulosten arviointia

Tässä luvussa analysoidaan kehitetyn simulointimallin avulla kahta nimellistehoiltaan varsin erilaista LCI-käyttöä. Ensimmäinen käyttöistä esitellään kappaleessa 5.1. Se perustuu erään todellisen LCI-käytön parametriarvoihin ja simulointitulosten rinnalla esitetään kyseisen käytön mittaustuloksia siltä osin, kun niitä on ollut saatavilla. Liitteessä B käsitellään käytön suunnanvaihtoa ja esitellään muutamia simulointituloksia suunnanvaihdossa. Kappaleessa 5.2 analysoitu teholtaan suurempi käyttöistä ei edusta mitään todellista käyttöä, vaan se on mitoitettu ja parametroidu kokonaan tässä työssä. Lopuksi kappaleessa 5.3 luodaan katsaus simulointimallin jatkokehitysnäkyymiin.

Esitettäväksi simulointituloksiksi on valittu käyttöjen järjestelmätasolla kiinnostavia tuloksia. Tällaisia ovat esimerkiksi suuntaajan ottama virta ja erityisesti laivakäytössä syöttöverkon pääjännite. Joistakin tuloksista on esitetty myös spektrit harmonisten yliaaltokomponenttien taajuuksien ja amplitudien selvittämiseksi. Spektrit on laskettu molemmissa käyttöissä yhden hertsin resoluutiolla ja korkeimpana mukaan otettavana taajuutena on ollut 2 kHz. Harmoninen kokonaissärö on kaikissa tapauksissa laskettu kaavan

$$\text{THD}_x = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{\max}} x_n^2}}{x_1} \quad (5.1)$$

avulla. Kaavassa yliaaltojen neliösumman neliöjuuri jaetaan siis *perusaallolla*. Tämä antaa hieman suuremman tuloksen kuin usein käytetty kaava, jossa on nimittäjässä perusaallon sijasta signaalin kaikkien komponenttien neliösumman neliöjuuri.

5.1 1 MW LCI-käytön simulointi- ja mittaustuloksia

5.1.1 Käytön päämitoitusarvot ja parametrit

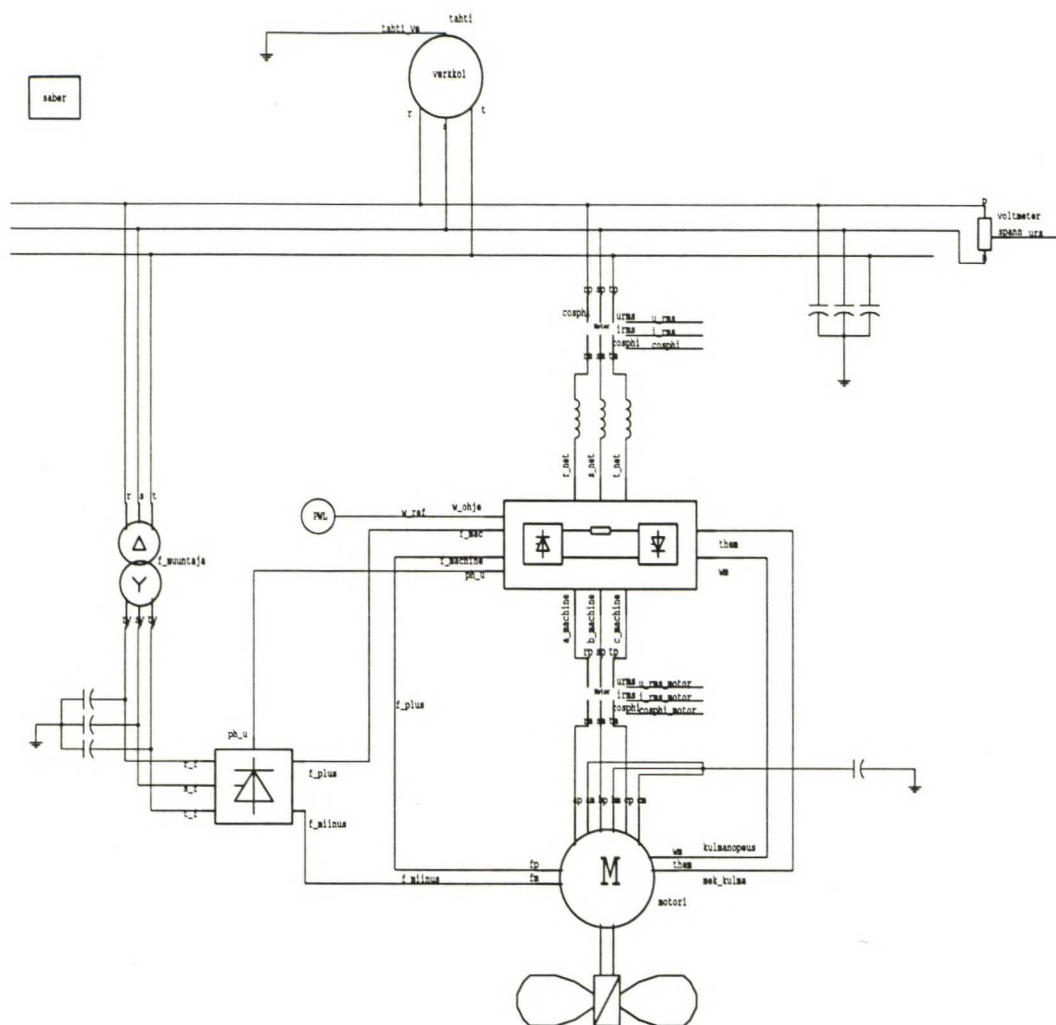
Tämä LCI-käyttö on mitoitettu vastaamaan merentutkimusalue Arandassa olevaa käyttöä. Käytön suuntaaja on kuusipulssinen ja tahtimoottori kolmivaiheinen. Käytön tunnetut parametrit on esitetty taulukossa 5.1. Tahtimoottorin muut ar-

Taulukko 5.1. Arandan parametrit

Tahtimoottori		Generaattorit	
P_n	1 MW	S_N	$2 \times 1570 \text{ kVA}$
U_n	600 V	U_N	660 V
I_n	1185 A	I_N	1373 A
$\cos \varphi$	0,85 kap	$\cos \varphi$	0,8
f_n	50 Hz	f_N	50 Hz
n_n	1000 rpm	n_N	1000 rpm
p	3	p	3
U_f	140 V	R_s	2,6 mΩ
I_f	72 A	x_d''	0,15
J	130 kgm ²	Välipiirikuristin	
x_d	0,97		
x_d'	0,20	L_{DC}	1,54 mH
x_d''	0,16		
x_q	0,52		
x_q''	0,15		

vot, kuten esimerkiksi induktanssit, on laskettu tunnettujen arvojen perusteella sellaisiksi, kuin LCI-käyttöjen moottoreissa tyypillisesti on. Hitausmassa muodostuu summasta, jonka termejä ovat moottorin roottorin hitausmassa, potkurin akselin ja potkurin arvioidut hitausmassat sekä arvioitu vesilisä. Muita käytön parametreja ei ollut saatavilla, joten ne on jouduttu arvioimaan. Tasapainotilan kannalta useimmilla niistä ei kuitenkaan ole kovin suurta merkitystä ja riittää, että ne ovat suuruusluokaltaan oikeita. Esimerkiksi PI-säätimien dynamiikalla ei nimellisuopeudella ajettaessa ole merkitystä, kunhan huolehditaan, ettei säätösuure ala värähdellä. Käytön simulointimallin ylimmän tason piirikaavio on esitetty kuvassa 5.1.

Arandan moottorin nimellinen pyörimisnopeus on 1000 rpm. Moottorin ja potkurin akseleiden välissä on alennusvaihe, jolla potkurin pyörimisnopeutta pu-



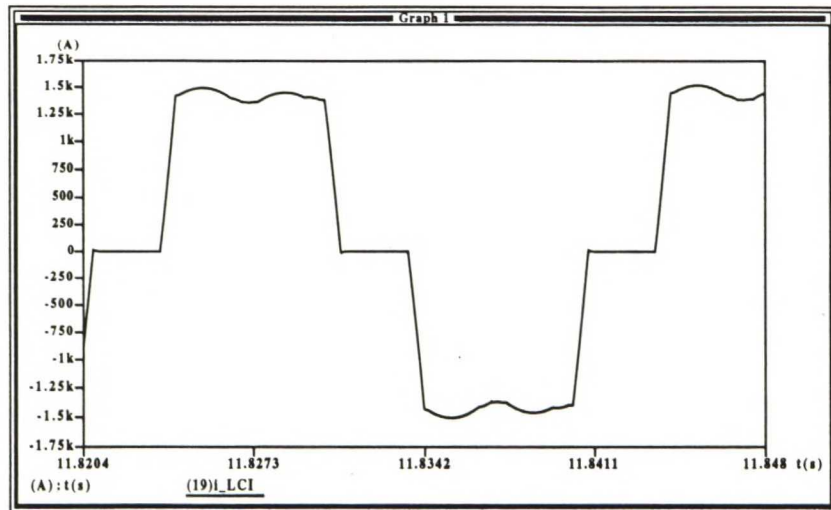
Kuva 5.1. Arandan simulointimallin pääpiirikaavio.

dotetaan nimellispisteen nopeuteen $n_{mek,n} = 170 \text{ rpm}$. Lisäksi Arandan potkurissa on säätölavat, joiden ansiosta esimerkiksi käynnistystä voidaan keventää. Eräs syy säätölapapotkurin käyttöön on laivan käyttötarkoitus. Merentutkimusalusta joudutaan tutkimuskäytössä usein pitämään lähes paikallaan, jolloin ilman säätölapapotkuria LCI-käytölle hankala suunnanvaihto jouduttaisiin toteuttamaan usein. Kun potkurin lapakulmaa muutetaan, potkurin työntövoiman suunta voidaan vaihtaa, vaikka moottori pyöriikin koko ajan samaan suuntaan.

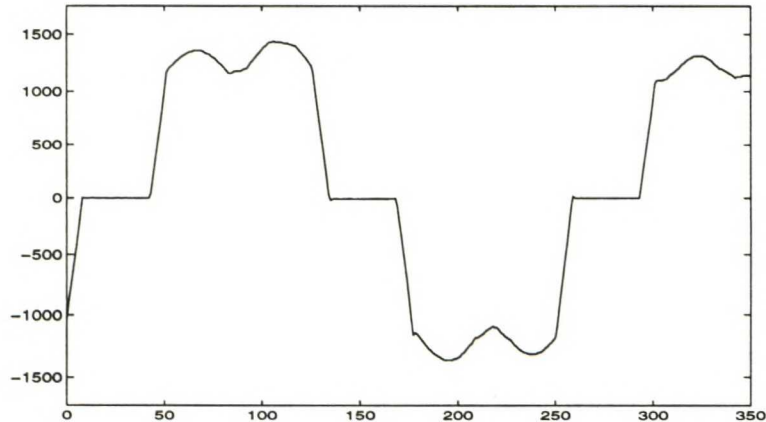
5.1.2 Ajo nimellisnopeudella

Tässä kappaleessa esitetään Arandan tyypillisiä mittaus- ja simulointituloksia ajo-tilanteessa, jossa moottorin pyörimisnopeus on nimellinen ja käyttö on stabiilissa tilassa.

Kuvassa 5.2 on esitetty käytön suuntaajan laivan syöttöverkosta ottama yhden vaiheen simuloitu virta ja kuvassa 5.3 suuntaajan ottama yhden vaiheen mitattu virta. Akseleilla merkintä "k" tarkoittaa luvun kertomista luvulla 10^3 . Mitatun virran aika-akselin lukuarvot osoittavat mittauksen näytepisteen järjestyslukua.



Kuva 5.2. Käytön suuntaajan verkosta ottama yhden vaiheen simuloitu virta

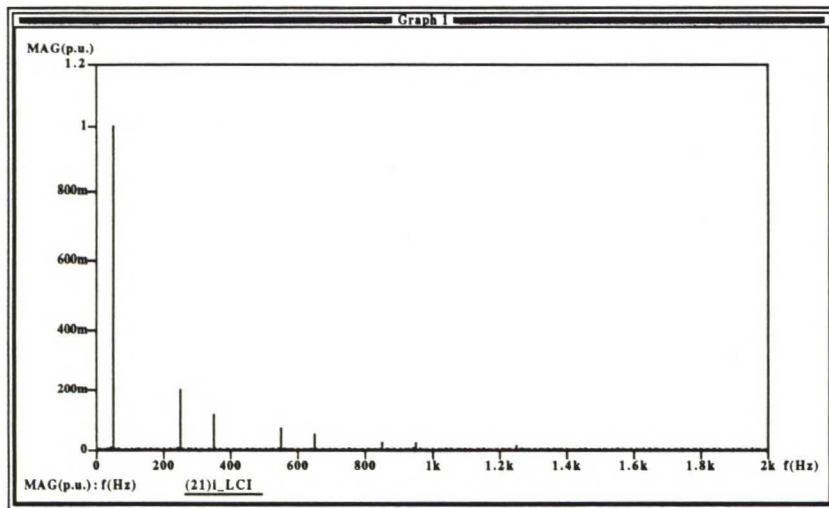


Kuva 5.3. Käytön suuntaajan verkosta ottama yhden vaiheen mitattu virta

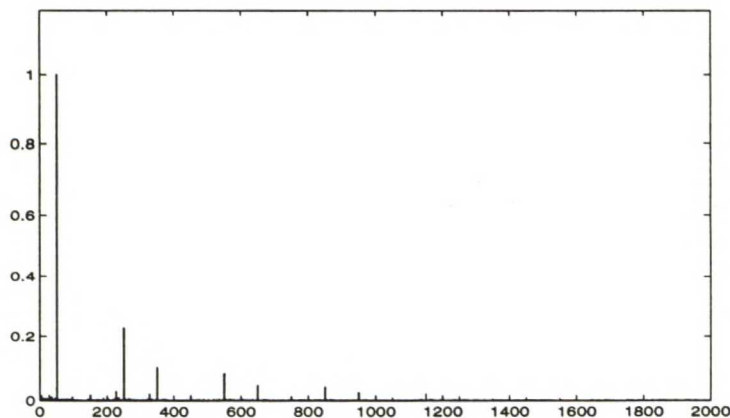
Virran käyrämuoto poikkeaa kuvassa 2.12 esitetystä, koska välipiirin virta ei ole tasaista. Virrassa näkyvä aaltoilu riippuu voimakkaasti moottorin syöttötaajuudesta. Tasapainotilassakin syöttötaajuus vaihtelee hieman koko ajan ja samalla virran aaltoilun voimakkuus muuttuu. Simuloitu ja mitattu virta edustavat periaatteessa samaa tasapainotilaa, mutta syöttötaajuuden hetkellisten vaihteluiden takia aaltoilu on mitatuissa tuloksissa jonkin verran voimakkaampaa. Mittaustuloksista olisi ollut mahdollista etsiä sellainen kohta, jossa tulos on lähes identtinen simuloitujen tulosten kanssa. Näin ei ole tehty, jotta aaltoilun vaihtelu saadaan

paremmin näkyviin. Aaltoisuuksien eroon simuloidun ja mitatun virran välillä on moottorin syöttötaajuuden vaihtelun ohella syynä lineaarinen kuristimen malli. Lineaarisen kuristimen induktanssi ei riipu virrasta ja tästä syystä simuloidun virran aaltoisuus on pienempää kuin mitatun virran. Todellinen kuristin on rautasydäminen ja kyllästyy, jolloin sen induktanssi pienenee suurilla virroilla ja virran aaltoisuus kasvaa.

Kuvassa 5.4 on suuntaajan ottaman vaihevirran simuloitu spektri ja kuvassa 5.5 suuntaajan ottaman vaihevirran mitattu spektri. Akseleilla merkintä "m" tar-



Kuva 5.4. Käytön suuntaajan verkosta ottaman yhden vaiheen virran simuloitu spektri



Kuva 5.5. Käytön suuntaajan verkosta ottaman yhden vaiheen virran mitattu spektri

koittaa luvun kertomista luvulla 10^{-3} . Spektrikomponenttien amplitudit on skaalattu siten, että perustaajuisen komponentin amplitudi on yksi. Spektreistä havaitaan, että kun perustaajuisen komponentin taajuus on f , suurimpien yliaalto-

komponenttien taajuudet f_k ovat

$$f_k = (6k \pm 1)f, \quad \text{missä } k = 1, 2, 3, \dots \quad (5.2)$$

Nämä ovat käytölle tyypillisiä yliaaltoja, mutta niiden lisäksi spektrit sisältävät myös ns. väliharmonisia taajuuskomponentteja. Niitä syntyy, koska välipiirivirta ei ole tasaista ja koska kommutointiaika ei ole nolla. Väliharmonisten taajuuskomponenttien amplitudit ovat pieniä verrattuna käytön tyypillisten yliaaltokomponenttien amplitudeihin.

Viitteen [26] mukaan virran aaltoisuuden kasvaessa 5. yliaallon amplitudi kasvaa ja 7. yliaallon amplitudi pienenee. Tämä käyttäytyminen havaitaan myös spektreistä. Syynä on todellisen käytön kyllästyvä kuristin, joka suurentaa mitatun virran aaltoisuutta simuloituun verrattuna, koska simulointimallin kuristin on lineaarinen.

Simuloidun virran harmoninen kokonaissärö laskettuna kaavan (5.1) mukaan on

$$\text{THD}_{i_{\text{LCI}},\text{sim}} = 27,5 \%. \quad (5.3)$$

Mitatun virran harmoninen kokonaissärö on

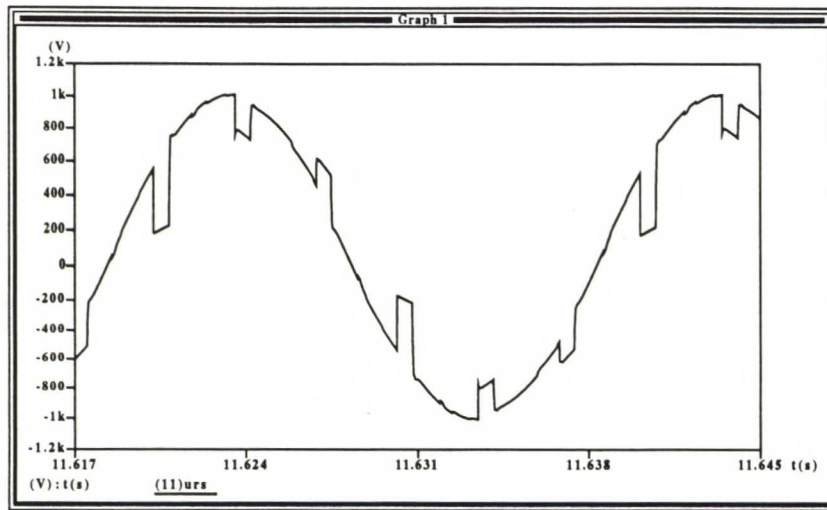
$$\text{THD}_{i_{\text{LCI}},\text{mit}} = 27,8 \%. \quad (5.4)$$

Säröprosentit ovat hyvin lähellä toisiaan.

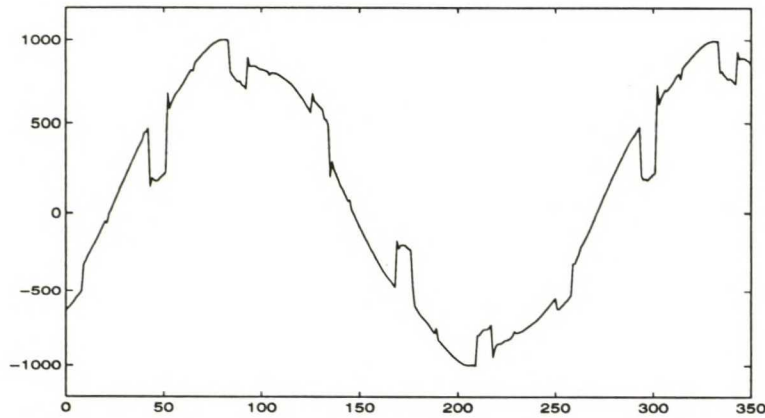
Kuvassa 5.6 on esitetty Arandan syöttöverkon simuloitu pääjännite ja kuvassa 5.7 syöttöverkon mitattu pääjännite. Jännitteissä näkyvät selvästi verkkosillan kommutoinneista aiheutuvat lovet.

Simuloidun ja mitatun pääjännitteen käyrämuodot vastaavat toisiaan hyvin. Kommutointilovien paikat, syvyydet ja kestoajat ovat kohtuullisella tarkkuudella molemmissa samat. Pienten erojen syynä ovat mm. moottorin induktanssit, jotka on mallissa jouduttu arvioimaan. Myöskään kaapeleiden ja kiskojen induktanssien ja maakapasitanssien todellisia arvoja ei tiedetä, mikä vaikuttaa simulointituloksiin. Yksi eroja selittävä tekijä on todellisen järjestelmän verkkoon kytketyt muut aktiiviset kuormat kuin suuntaaja. Niiden vaikutusta pohditaan tarkemmin jännitteiden spektrien yhteydessä. Kommutointikuristimien ansiosta verkon jännite ei putoa kommutoinnin aikana nolleen asti.

Kuvassa 5.8 on syöttöverkon pääjännitteen simuloitu spektri ja kuvassa 5.9 pääjännitteen mitattu spektri. Simuloidun spektrin komponenttien amplitudit on skaalattu siten, että perustaaajuisen komponentin amplitudi on yksi. Simuloidut ja mitatut spektrit vastaavat toisiaan hyvin. Molemmissa spektreissä suurimpien yliaaltokomponenttien taajuudet f_k ovat kaavan (5.2) mukaiset, kun perustaaajuus



Kuva 5.6. Arandan syöttöverkon simuloitu pääjännite



Kuva 5.7. Arandan syöttöverkon mitattu pääjännite

on f . Näiden lisäksi jännitteen spektri sisältää komponentteja myös muilla taajuuksilla samaan tapaan kuin vaihevirtakin, mutta niiden amplitudit ovat hyvin pieniä.

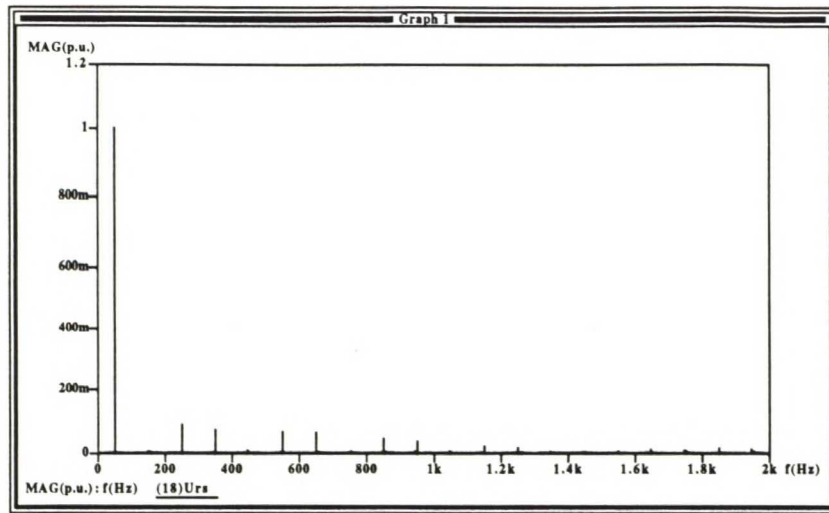
Simuloidun jännitteen harmoninen kokonaissärö on

$$\text{THD}_{U_N, \text{sim}} = 18,0 \%. \quad (5.5)$$

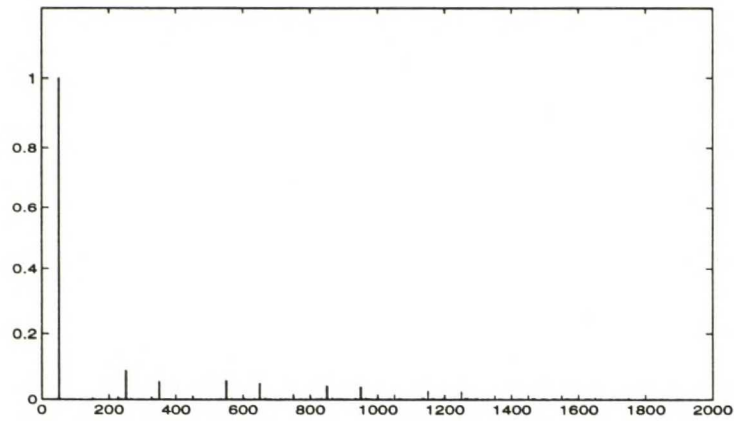
Mitatun jännitteen harmoninen kokonaissärö on

$$\text{THD}_{U_N, \text{mit}} = 15,6 \%. \quad (5.6)$$

Mitattu jännitesärö on pienempi kuin simuloitu. Tähän ovat syynä muut mittaus-tilanteessa verkkoon kytketyt aktiiviset kuormat kuin suuntaaja. Suurin yksittäinen tällainen kuorma on Arandan 150 kVA moottorigeneraattori, jonka generaattoripuolen sinimuotoisella jännitteellä syötetään laivan särölle herkkiä kulutuslaitteita. Lisäksi verkkoon on aina kytketty vaihteleva määrä erilaisia pumppu-



Kuva 5.8. Arandan syöttöverkon pääjännitteen simuloitu spektri



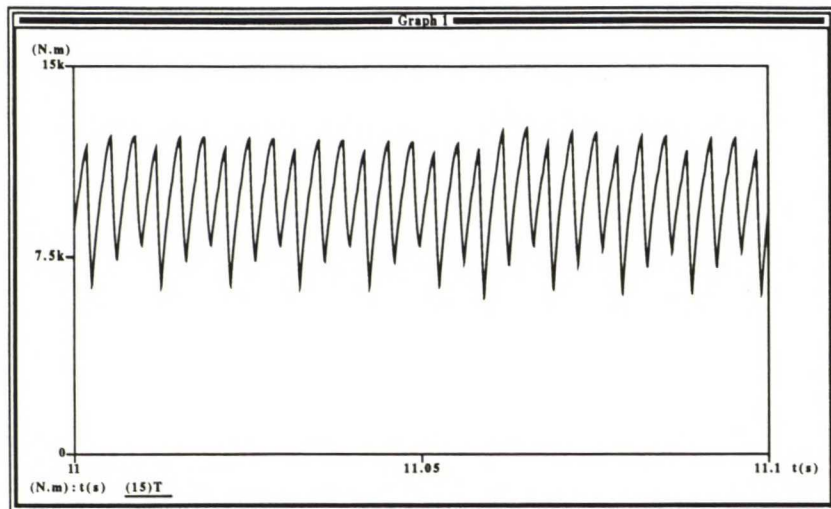
Kuva 5.9. Arandan syöttöverkon pääjännitteen mitattu spektri

ja puhallinmoottoreita ym. pienehköjä moottoreita. Simulointimallissa tällaisia muita kuormia ei ole mallinnettu ja siksi potkurikäytön suuntaaja säröyttää pääjännitettä simuloinneissa mitattua enemmän.

Kuvassa 5.10 on esitetty käytön simuloitu ilmvälimomentti. Momentti aaltoilee kappaleessa 2.2.4 esitetyllä tavalla. Konesillan sytytyskulma on simuloidussa tilanteessa 144° . Mikäli käyttöön olisi toteutettu kappaleessa 2.2.5 esitetty kommutointivaran säätö, sytytyskulmaa olisi mahdollista nostaa suuremmaksi, jolloin momentin aaltoisuutta saataisiin pienemmäksi.

Ideaalisen käytön ilmvälimomentissa esiintyy yliaaltoja kappaleen 2.2.4 mukaisesti. Niiden taajuuudet f_k voidaan laskea kaavan

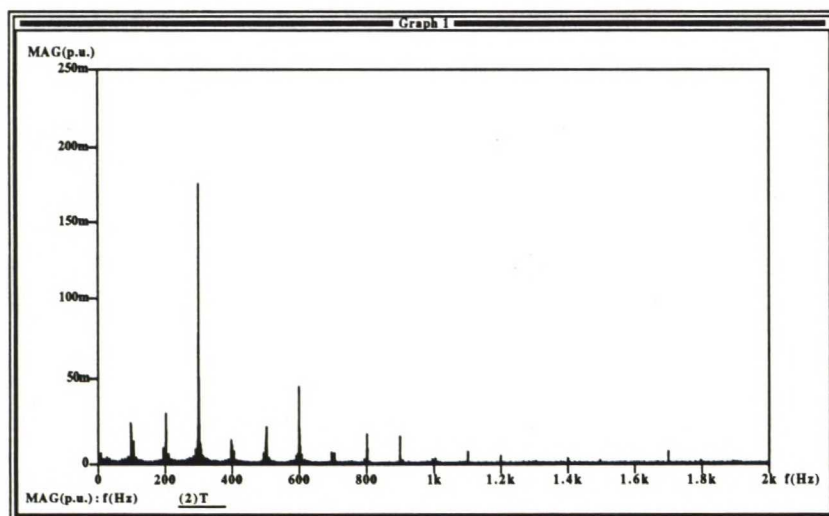
$$f_k = 6kf, \quad \text{missä } k = 1, 2, 3, \dots \quad (5.7)$$



Kuva 5.10. Arandan simuloitu ilmapäivämomentti

avulla, kun perustaajuudeksi f asetetaan moottorin syöttötaajuus.

Todellisen käytön momentti sisältää myös muita taajuuskomponentteja. Näiden syntymekanismeja käsiteltiin myös kappaleessa 2.2.4. Kuvassa 5.11 on ilmapäivämomentin spektri, josta voidaan lukea eri taajuuskomponenttien suhteelliset amplitudit. Spektrin komponentit on skaalattu siten, että tasakomponentin amplitudi on yksi. On huomattava, että amplitudiakseli on kuvassa 0,25 (250m). Kuvasta nähdään, että suurimmat taajuuskomponentit esiintyvät taajuuksilla,



Kuva 5.11. Arandan simuloitu ilmapäivämomentin spektri

jotka ovat moottorin syöttötaajuuden kokonaislukukerrannaisia. Varsinkin kaavan (5.7) mukaisilla taajuuksilla olevat komponentit ovat suuria. Lisäksi momentti sisältää komponentteja, jotka eivät ole perustaajuuden monikertoja. Osa

komponenteista esiintyy hyvin matalilla taajuuksilla, mistä voi aiheutua mekaanisia resonansseja.

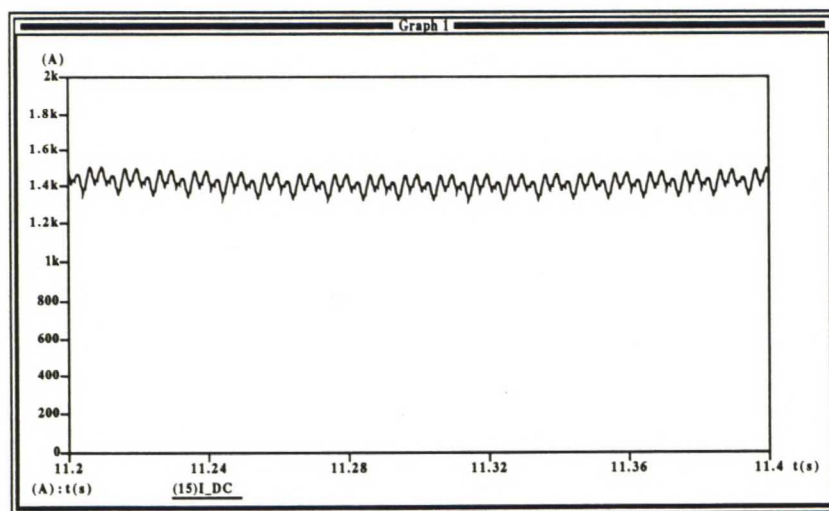
Simuloidun ilmvälimomentin harmoninen kokonaissärö on

$$\text{THD}_{T,\text{sim}} = 23,0\%. \quad (5.8)$$

Särö on laskettu kaavan (5.1) avulla aloittamalla osoittajan summalausekkeessa indeksointi luvusta $n = 1$ ja korvaamalla nimittäjässä perusaalto tasakomponentilla.

Potkurin akselilla vaikuttavan vääntömomentin yliaallot eivät ole yhtä suuria kuin ilmvälimomentin yliaallot. Koska potkurin hitausmassa on tyypillisesti suunnilleen roottorin hitausmassan suuruinen ja vaihteiston sekä potkurin akselin hitausmassa näiden rinnalla pieni, akselilla vaikuttavaksi ja esimerkiksi vaihteistoa rasittavaksi vääntömomentin yliaaltosisällöksi voidaan arvioida noin puolet ilmvälimomentin yliaaltosisällöstä.

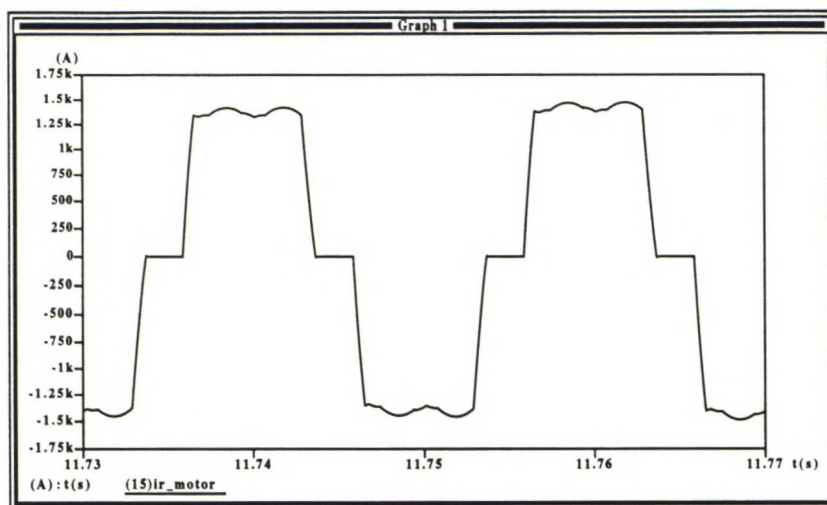
Kuvassa 5.12 on esitetty välipiirin virta. Äärellisen induktanssin takia virta ei ole tasaista, mutta hetkellisarvon poikkeamat keskimääräisestä arvosta eivät ole kovin suuria. Virran suurimmaksi aaltoisuudeksi määritettynä kappaleen 2.1.7



Kuva 5.12. Välipiirin simuloitu virta

mukaisesti voidaan kuvasta lukea noin 0,05. Jos tätä ja käytön tunnettuja arvoja käytetään lähtöarvoina ja määrätään välipiirin induktanssi kappaleessa 2.1.7 esitettyllä tavalla, saadaan tulokseksi simulointimallissa ja todellisessa käytössä käytetty välipiirin induktanssi. Mitoitusohjetta voidaan näin pitää ilman erillistä virheanalyysiäkin melko tarkkana.

Kuvassa 5.13 on esitetty käytön moottorin simuloitu vaihevirta. Moottorin virta on suuntaajan verkosta ottaman virran kanssa samanmuotoinen, mutta yleisesti virtojen taajuuudet ovat eri suuret. Kuva 5.13 on tilanteesta, jossa käyttö toimii nimellispisteessä. Arandassa moottorin nimellinen syöttötaajuus on yhtä suuri kuin verkon nimellistaajuus, joten tässä tapauksessa moottorin virran ja suuntaajan verkosta ottaman virran taajuuudet ovat samat.



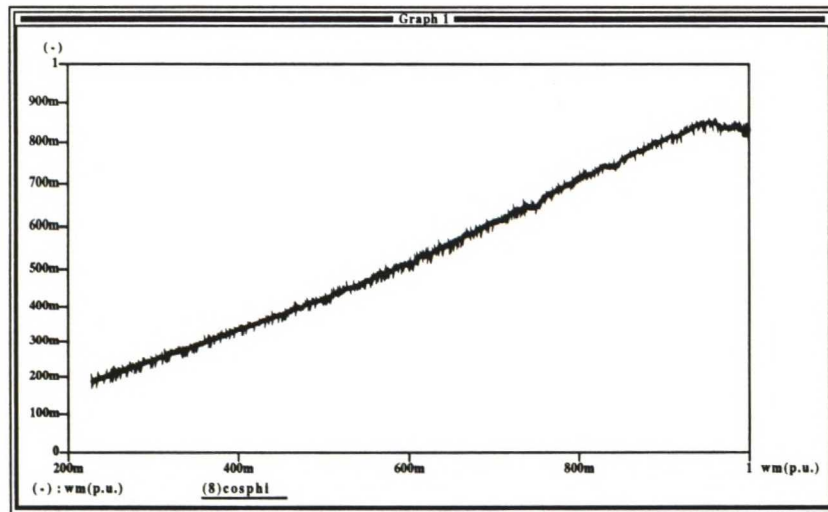
Kuva 5.13. Moottorin simuloitu virta

Moottorin virta sisältää yliaaltoja. Yliaallot aiheuttavat resistiivisiä häviöitä lämmittäen staattorikäämiä, joten niiden vaikutus on otettava kappaleessa 2.1.6 sivulta 25 alkaen selostetun kapasitiivisen tehokertoimen ohella huomioon moottorin käämitystä suunniteltaessa.

5.1.3 Käynnistys nimellismoiteen

Laivaverkoissa verkon tehokertoimella on suuri merkitys. Jos suuntaajan tehokerroin on pieni, se ottaa suuren virran verkosta, vaikka siirtyvä pätöteho on pieni. Tämä rasittaa syöttöverkkoa ja generaattoreita. Kun dieselgeneraattoreiden tuottama pätöteho on pieni, dieselmoottorin kuorma on vain osa nimellisestä. Tämä alentaa moottorin hyötysuhdetta ja lisää karstoittumista pienentäen huoltoväliä. Pienestä pätötehosta huolimatta generaattoreiden virta on kuitenkin suuri huonon tehokertoimen ansiosta. Joissakin tilanteissa vaadittava virta voi olla niin suuri, että sen tuottamiseksi verkkoon joudutaan kytkemään lisää generaattoreita, vaikka pätötehoreserviä on jo kytketyissäkin riittävästi jäljellä. Suuri loisivirta lisää myös käytön resistiivisiä häviöitä alentaen käytön hyötysuhdetta.

Kuvassa 5.14 on esitetty Arandan simuloitu verkon tehokerroin moottorin suhteellisen pyörimisnopeuden funktiona. Tehokerroin kasvaa lineaarisesti nopeuden funktiona, kuten sen pitääkin.

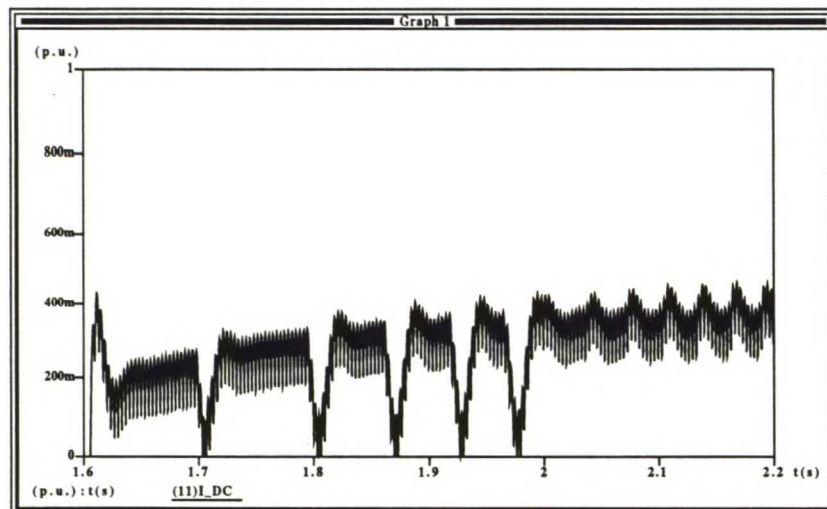


Kuva 5.14. Koko käytön simuloitu tehokerroin moottorin suhteellisen pyörimisnopeuden funktiona

LCI-käytön tehokerroin riippuu pääasiassa verkkosillan aiheuttamasta ohjaus- ja kommutointiloistehosta. Ohjausloisteho kasvaa sillan ohjauskulman kasvaessa. Kommutointiloistehoon vaikuttavat kommutoitavan virran ja kommutoivan jännitteen suuruudet. Kun moottorin nopeus on pieni, moottorin liikejännite ja verkkosillalta vaadittava lähtöjännite ovat pieniä ja verkkosillan ohjauskulma on likimäärin 90° . Moottorin nopeuden kasvaessa liikejännite kasvaa, kunnes kentänheikennysalue alkaa. Jotta verkkosilta pystyisi syöttämään virtaa moottoriin, sillan jännitteen tulee kasvaa moottorin nopeuden kasvaessa. Verkkosillan

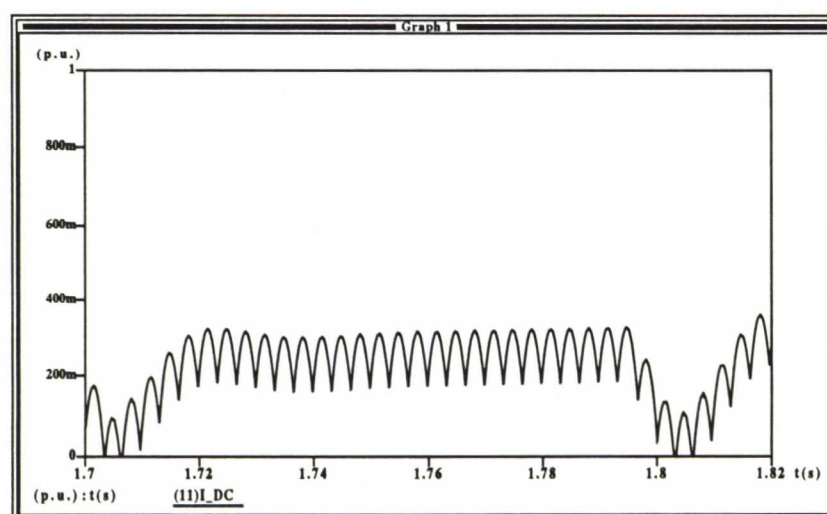
lähtöjännitteen kasvattaminen tapahtuu sillan ohjauskulmaa pienentämällä, jolloin verkon tehokerroin paranee.

Kuvassa 5.15 on käytön simuloitu välipiirivirta suhteellisarvona käynnistyksessä, kun perusasrvona on moottorin nimellinen vaihevirta. Virta putoaa nollaan pulsimaisen virran alueella niissä kohdissa, joissa konesillan johtavaa tyristoriparia vaihdetaan. Kuvassa 5.16 on samasta virrasta suurennettuna toisen virtapulssin



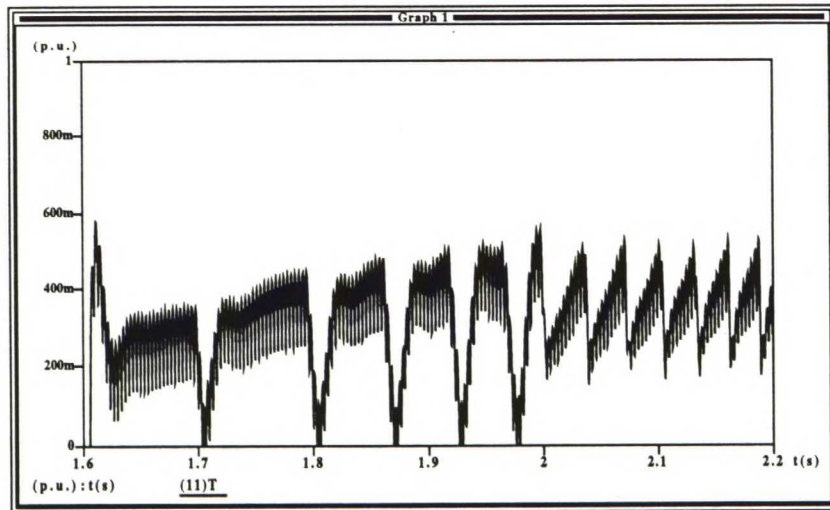
Kuva 5.15. Välipiirin simuloitu virta käynnistyksessä

kohta. Siitä voidaan selvästi nähdä verkkosillan jännitteen hetkellisarvon muutokset, jotka saavat äärellisen välipiirikuristimen virran hetkellisarvon vaihtelevaan syöttöverkon taajuudella.



Kuva 5.16. Simuloidun välipiirivirran suurennettu kuva toisen virtapulssin kohdalta

Kuvassa 5.17 on moottorin simuloitu ilmapälimomentti käynnistuksessa. Momentti putoaa pulssimaisen virran alueella nollaan niissä kohdissa, joissa väli-
piirin virtakin on nolla. Tästä voi olla tietyissä tilanteissa haittaa, jos pienillä
nopeuksilla vaaditaan jatkuvaa momenttia. Tällainen tilanne voi syntyä esimer-
kiksi ajettaessa ahtojäässä, jolloin laivan nopeus ei voi nousta kovin korkeaksi,
mutta potkurin on rikkoutumisen estämiseksi pyörittävä koko ajan. Arandassa on
mahdollisuus kytkeä dieselmoottori vaihteiston välityksellä suoraan potkurin ak-
seliin ja jättää suuntaaja käyttämättä. Tällöin menetetään sähkökäytön tuomat
edut, mutta potkurin pyöriminen saadaan pienillä nopeuksilla luotettavammaksi
kuin suuntaajaa käytettäessä. Aivan nollanopeudella ei tällä tavalla saada mo-
menttia, mutta nollanopeuden läheisyydessä käynti on kuitenkin luotettavampaa
kuin käytettäessä sähkökäyttöä.



Kuva 5.17. Moottorin simuloitu ilmapälimomentti käynnistuksessa

5.2 21 MW LCI-käytön simulointituloksia

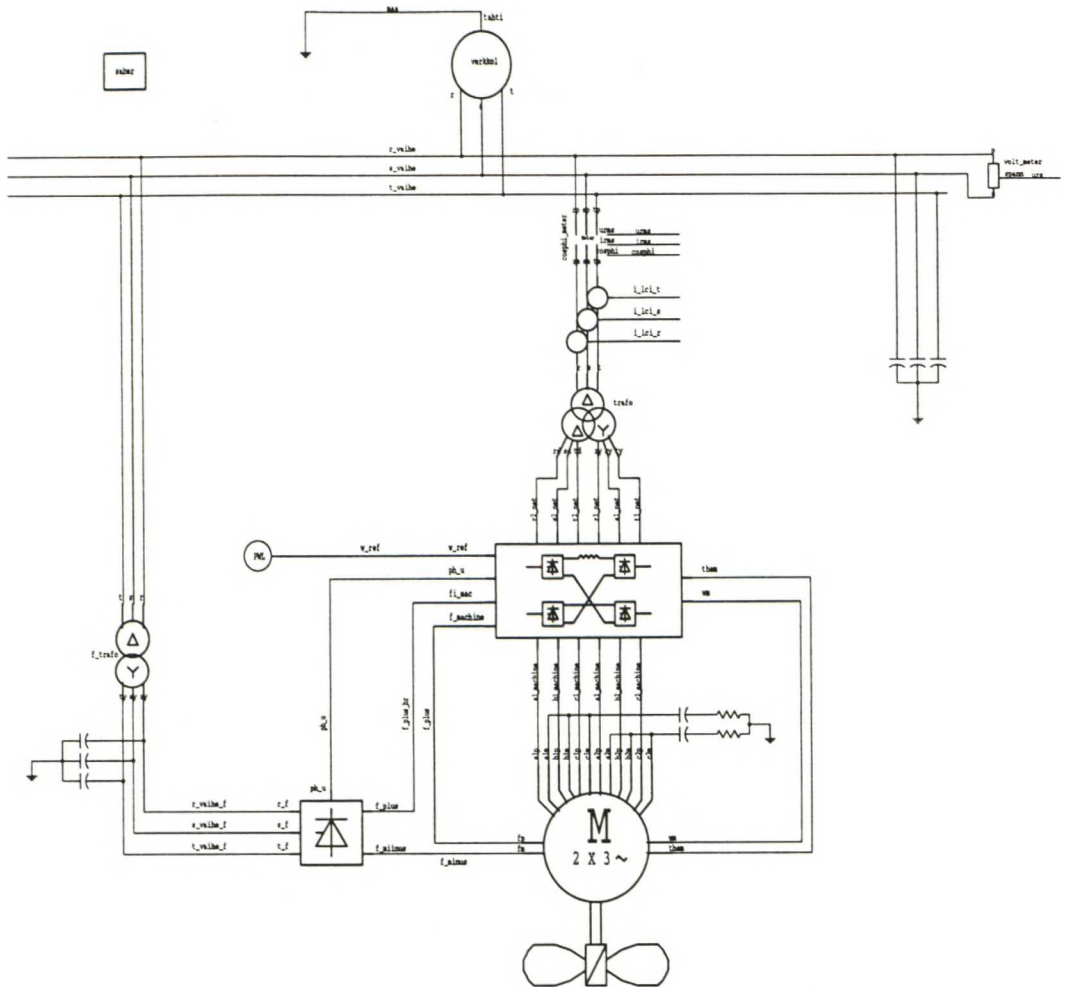
21 MW käytön suuntaaja on kaksitoistapulssinen ja moottori 2×3-vaiheinen. Käytön oleelliset parametrit on esitetty taulukossa 5.2. Kaikki simulointitulokset on laskettu nimellispisteessä.

Taulukko 5.2. 21 MW käytön parametrit

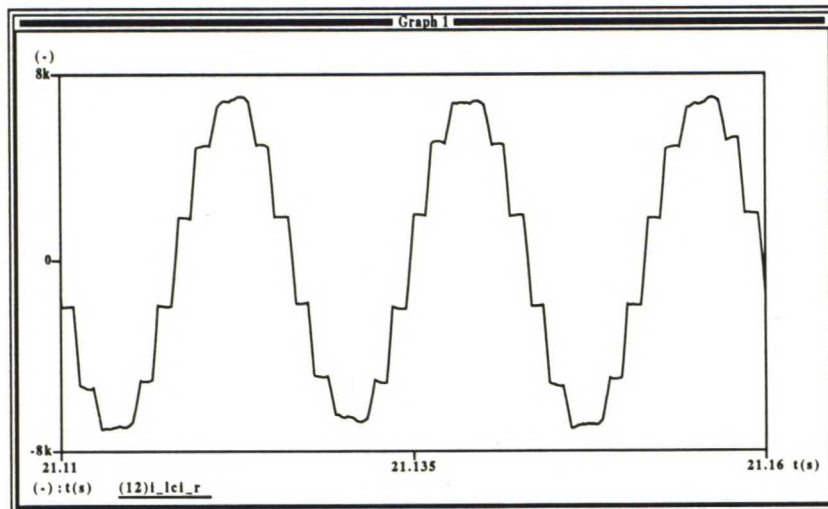
Tahtimoottori		Generaattorit	
P_n	21 MW	S_N	50 MVA
U_n	$2 \times 2300 \text{ V}$	U_N	3 kV
I_n	3,15 kA	$\cos \varphi$	0,8
$\cos \varphi$	0,85 kap	f_N	60 Hz
f_n	40 Hz	R_s	2,3 mΩ
n_n	150 rpm	x_d''	0,20
p	16		
U_f	300 V		
I_f	700 A		
J	347 000 kgm ²		
x_d	0,9	Välipiirikuristin	
x_d'	0,24		
x_d''	0,15	L_{DC}	1 mH
x_q	0,50		
x_q''	0,16		

Käytön simulointimallin pääpiirikaavio on esitetty kuvassa 5.18. Suuntaajaa syötetään Ddy-kytketyllä kolmikäämimuuntajalla 30 asteen vaihesiirron saamiseksi verkkosilloille. Tahtimoottorin staattori on erilliskäämitty ja kumpikin kolmi-vaihejärjestelmä on kytketty tähteen koneen ulkopuolella. Tähtipisteet on lisäksi kytketty toisiinsa ja maadoitettu suuren resistanssin ja pienen kapasitanssin kautta. Todellisessa käytössä tähtipisteillä ei ole galvaanista yhteyttä toisiinsa eikä maatasoon. Myös simulointimallissa maadoituskomponenttien lukuarvot ovat sellaiset, että järjestelmä käyttäytyy kuten maasta erotettu järjestelmä.

Kuvassa 5.19 on esitetty käytön suuntaajan verkosta ottama virta aikatasossa. Jo silmämääräisestikin arvioituna virta on sinimuotoisempaa kuin kuvassa 5.2 esitetty kuusipulssisen käytön suuntaajan ottama virta.



Kuva 5.18. 21 MW käytön simulointimallin pääpiirikaavio



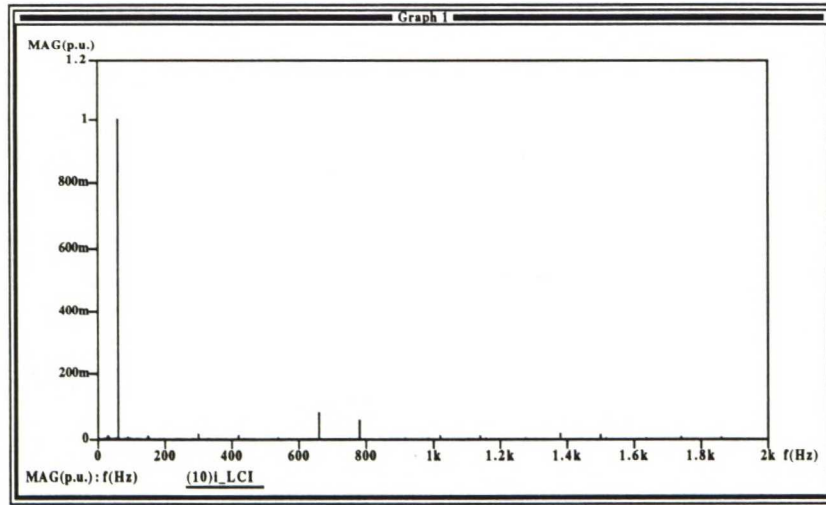
Kuva 5.19. 21 MW käytön suuntaajan verkosta ottama yhden vaiheen simuloitu virta

Kuvassa 5.20 suuntaajan ottaman virran spektri. Spektrikomponentit on skaalattu siten, että perusaallon amplitudi on yksi. Todellinen perusaallon amplitudi on 6,97 kA ja todellinen perusaallon tehollisarvo 4,93 kA. Perusaallon taajuus on syöttöverkon taajuus $f = 60$ Hz. Suurimpien yliaaltokomponenttien taajuudet f_k ovat

$$f_k = 12k \pm 1, \quad \text{missä } k = 1, 2, 3, \dots \quad (5.9)$$

Suuntaajan ottama virta sisältää myös muita harmonisia komponentteja, vaikka niiden amplitudit ovat pieniä. Harmoninen kokonaissärö on kaavan (5.1) mukaan laskettuna

$$\text{THD}_{i_{LCI}} = 10,49 \%. \quad (5.10)$$

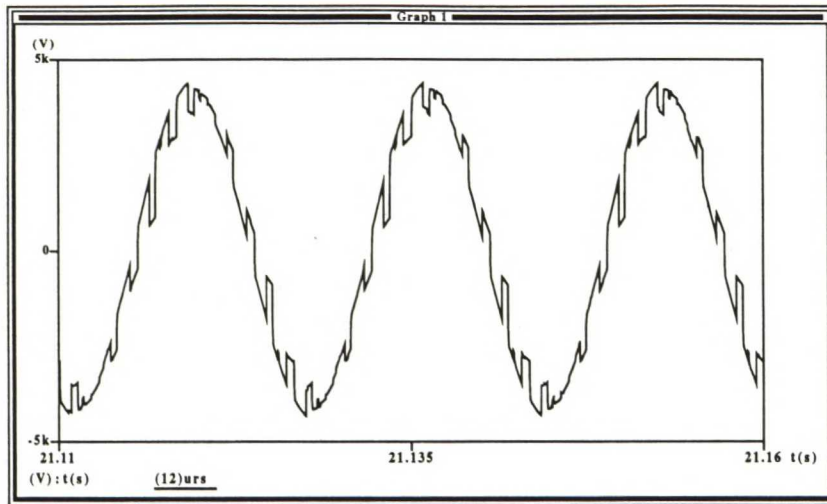


Kuva 5.20. 21 MW käytön suuntaajan verkosta ottaman yhden vaiheen virran simuloitu spektri

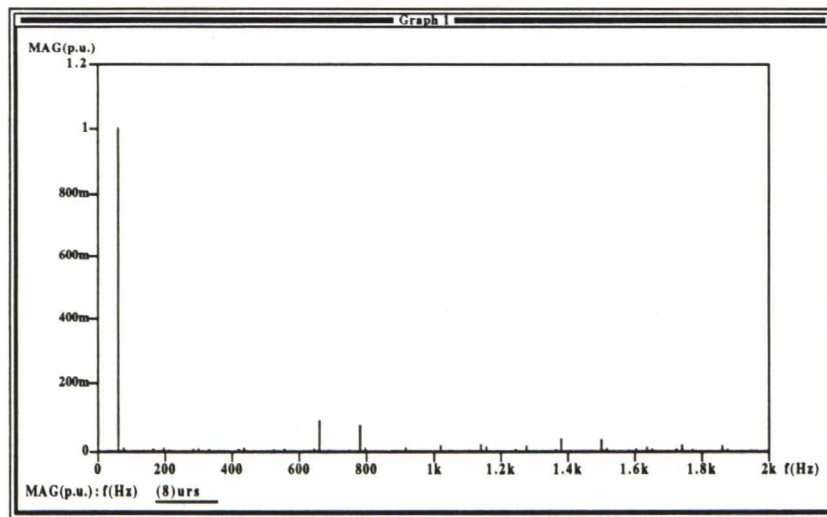
Kuvassa 5.21 on esitetty käytön syöttöverkon pääjännite. Pääjännitteessä on kommutointilovia tiheämmin kuin vastaavassa kuusipulssisessa käytössä. Ne ovat kuitenkin kapeampia ja matalampia, joten jännitteen särötaso on alhaisempi. Kuvassa 5.22 on pääjännitteen spektri, josta eri taajuuskomponenttien suhteelliset amplitudit voidaan lukea perusaallon amplitudin ollessa yksi. Pääjännitteen perusaallon todellinen amplitudi on 4,06 kV ja todellinen tehollisarvo 2,87 kV. Harmoninen kokonaissärö on

$$\text{THD}_{U_N} = 13,72 \%, \quad (5.11)$$

mitä voidaan pitää melko korkeana arvona. Jos verkkoon olisi kytkettynä muita aktiivisia kuormia, särötaso olisi tulosta (5.11) jonkin verran pienempi. Samankokoisen syklokonvertterikäytön pääjännitteen särö on tyypillisesti noin 6–8 %.

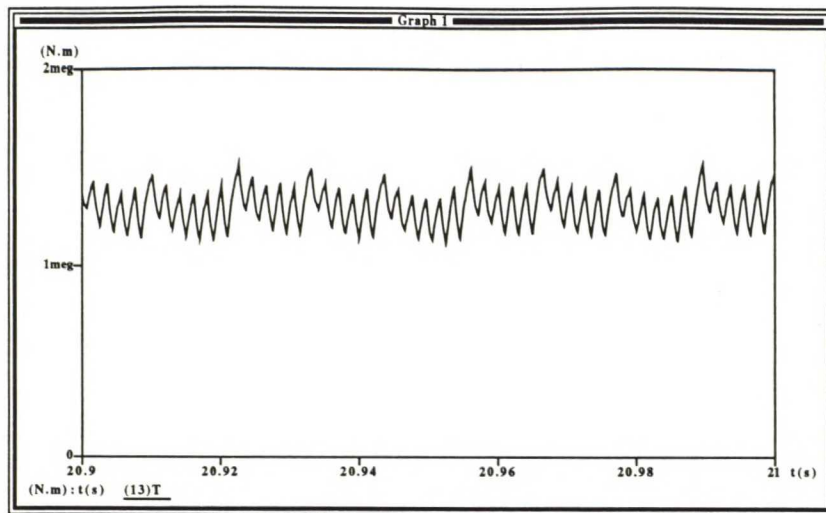


Kuva 5.21. 21 MW käytön syöttöverkon simuloitu pääjännite



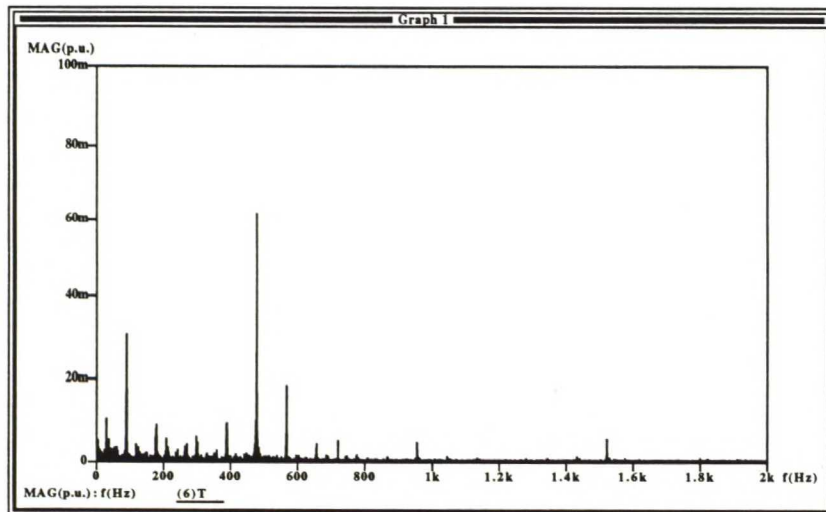
Kuva 5.22. 21 MW käytön syöttöverkon pääjännitteen simuloitu spektri

Kuvassa 5.23 on esitetty käytön moottorin simuloitu ilmavälimomentti. Momentin hetkellisarvo ei ole tasainen. Suurimman ja pienimmän arvon erotuksen suhde momentin keskiarvoon on noin 0,25. Kuvasta havaitaan selvästi käytölle tyypillinen momentin askeltaminen taajuudella, joka on 12 kertaa moottorin syöttötaajuus. Tämän lisäksi momentin hetkellisarvossa esiintyy vaihtelua erilaisten epäideaalisuuksien takia. Pääsytitä vaihteluun ovat yliaaltoja sisältävä välipiirivirta ja hetkellisarvoltaan vaihteleva ilmavälivirta. Magnetointisilta on kuusipulssinen, joten sen tasajännitepuolen jännite on säröytynyttä. Moottorin roottorikäänin induktanssi tasoittaa virtaa, mutta induktanssista huolimatta virtaan jää yliaaltoja, jotka näkyvät vuossa. Lisäksi vuo vaihtelee staattorivirran askeltamisen takia. Vaikka moottorissa on vahva vaimennuskäämitys, vuohon jää yliaaltoja,



Kuva 5.23. 21 MW käytön simuloitu ilmavälimomentti

jotka yhdessä epätasaisen välipiirivirran kanssa aiheuttavat momenttiin yliaaltoja. Kuvassa 5.24 on esitetty ilmavälimomentin spektri, josta momentin yliaaltojen taajuudet ja amplitudit voidaan lukea. Spektrin komponentit on skaalattu



Kuva 5.24. 21 MW käytön ilmavälimomentin simuloitu spektri

siten, että tasakomponentin amplitudi on yksi. Suurimman yliaaltokomponentin taajuus on teorian mukaisesti

$$f_{12} = 12f_n = 12 \cdot 40 \text{ Hz} = 480 \text{ Hz.} \quad (5.12)$$

Ilmavälimomentin harmoninen kokonaissärö on

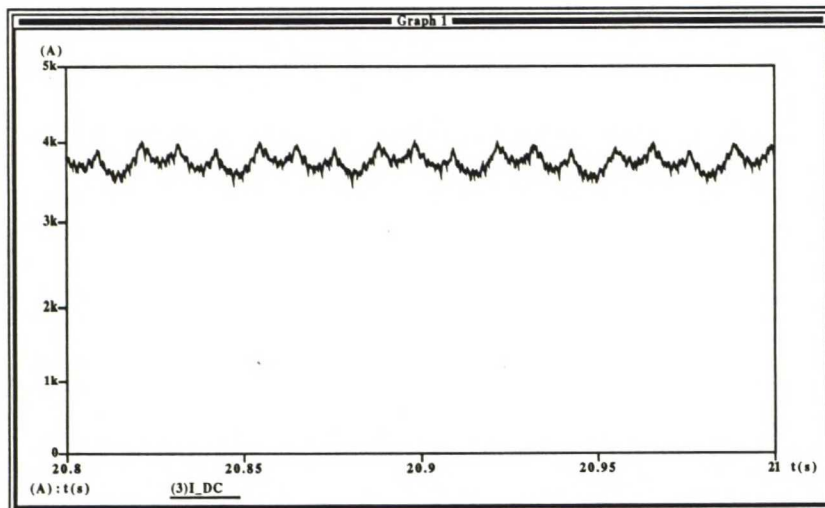
$$\text{THD}_T = 9,51 \%, \quad (5.13)$$

kun summalausekkeen indeksointi aloitetaan luvusta $n = 1$ ja nimittäjän perusaalto korvataan tasakomponentilla kaavan (5.8) tapaan.

Spektrin komponenttien amplitudit ovat odotetusti pienempiä kuin kuusipulssisen käytön tapauksessa. Tässäkin käytössä ilmavälimomentissa esiintyy myös muita kuin käytölle tyypillisiä spektrikomponentteja. Erityisesti on huomattava, että matalilla taajuuksilla näitä väliharmonisia spektrikomponentteja on hyvin paljon ja myös yksittäisiä selvästi muita korkeampia komponentteja esiintyy runsaasti. Nämä komponentit voivat aiheuttaa mekaanisia rasituksia. Moottorin syöttötaajuuden muuttuessa myös spektrikomponenttien taajuudet muuttuvat.

Potkurin akselilla vaikuttavan momentin yliaaltojen amplitudit ovat noin puolet ilmavälimomentin yliaaltojen amplitudeista Arandan käytön yhteydessä kappaleessa 5.1.2 sivulla 70 esitetyn mukaisesti.

Kuvassa 5.25 on esitetty käytön välipiirin virta. Virran aaltoisuus on samaa luokkaa kuin kuusipulssisen Arandan käytössä. Mikäli välipiirireaktanssin suhteellinen arvo olisi yhtä suuri kuin Arandan käytössä, virran aaltoisuus olisi huomattavasti kuvan 5.25 mukaista pienempi. Mallissa käytetty reaktanssin suhteellisarvo on kuitenkin vain noin neljäsosa Arandan suhteellisesta välipiirireaktanssista, mikä on tyypillinen mitoitusarvo kaksitoistapulssisen LCI-käytön välipiirireaktanssille.



Kuva 5.25. 21 MW käytön simuloitu välipiirin virta

5.3 Simulointimallin jatkokehitysnäkymiä

Simulointimallin jatkokehityksen tavoitteena on tarkentaa mallia mm. kehittämällä säätöjärjestelmään kommutointivaran säätöpiiri, jolloin moottorin teho-kerrointa saadaan parannettua ja vääntömomentin aaltoisuutta pienennettyä. Jatkossa on myös kehitettävä tarkempi potkurimalli esimerkiksi takateholaskelmien suorittamiseksi.

Erilaisten vikatilanteiden ja kytkentäilmiöiden analysointi on tärkeää, koska ne vaikuttavat järjestelmän mitoittamiseen ja suojauskoordinaation toteutukseen. Tällaisia laskelmia varten simulointimallissa on kuristimien ja muuntajien kyllästyksen vaikutus otettava huomioon.

LCI-käytön vääntömomentin epätasaisuus vähenee suuntaajan pulssiluvun kasvaessa. Käytännössä laivakäytöt rakennetaan tästä syystä nykyisin yleensä kaksitoistapulssisiksi. Tällä hetkellä simulointimallin avulla on mahdollista simuloida kuusi- ja kaksitoistapulssisten LCI-käyttöjen toimintaa. On myös suunniteltu ns. virtuaalista 24-pulssista käyttöä, jonka toiminta perustuu kahden kaksitoistapulssisen käytön tahdistettuun rinnankäyntiin, mutta tällaisen käytön simulointimallia ei ole vielä toteutettu.

Laivaverkkojen laskennassa tasapainotilanteen analysointi on usein tärkeämpää kuin tasapainoon johtavan muutosilmiön tarkastelu. Tästä syystä transientti-analyysi on monesti tarpeettoman raskas laskettava ja jatkossa on tärkeää kehittää menetelmiä, joilla tasapainotila voidaan saavuttaa nopeammin.

Virtuaalisen 24-pulssisen käytön mallintamista voidaan pitää pidemmän tähtäimen tavoitteena samoin kuin numeerisen laskennan kannalta nopeammin toimivan analyttisiin tuloksiin perustuvan toiminnallisen suuntaajamallin kehittämistä.

Luku 6

Johtopäätökset

Tässä diplomityössä on kehitetty konekommutoidun tahtimoottorikäytön simulointimalli. Malli on kehitetty laivan sähköjärjestelmää vastaavaksi, mutta sillä voidaan helposti simuloida myös muita—esimerkiksi pumppu- ja puhallinkäyttöjä. Laivan sähköjärjestelmälle tunnusomaisia piirteitä ovat syöttöverkon pieni oikosulkuteho verrattuna potkurimoottorin tehoon sekä moottorin alhainen pyörimisnopeus. Varsinainen suuntaaja ei poikkea laivakäytössä muiden käyttöjen suuntaajista.

Mallin avulla on analysoitu LCI-käyttöä erilaisissa laivakäyttöille tyypillisissä tilanteissa. Simulointitulosten tarkkuutta on selvitetty vertaamalla tuloksia vastaavan todellisen käytön mittaustuloksiin ja vertailun perusteella simulointituloksia voidaan pitää riittävän tarkkoina käytön sähköisen toiminnan selvittämiseen.

LCI-käyttö on simuloinneissa osoittautunut toimivaksi ratkaisuksi laivakäyttöihin, jos käytöltä ei vaadita suurta momenttia pienillä nopeuksilla. Jäänmurtajiin ja muihin hidasta pyörimisnopeutta ja toistuvia suunnanvaihtoja vaativiin erikoisaluksiin syklokonvertterikäyttö on nykyisin parempi ratkaisu, mutta tulevaisuudessa jännitevälipiirisuuntaajaan perustuva käyttö lienee paras vaihtoehto myös suuritehoisissa käytöissä. LCI-käytön etu verrattuna syklokonvertterikäyttöön on saavutettava korkea syöttötaajuus, jolloin hyvin nopeissakin aluksissa moottorin napapariluku voidaan pitää kohtuullisen suurena.

Työn tavoitteiksi asetettiin LCI-käytön teoreettinen analysointi ja toimivan simulointimallin kehittäminen määrättyihin laskentatarpeisiin. Erityisen tärkeänä pidettiin laivaverkon särötason ja tahtimoottorin vääntömomenttivärähtelyiden selvittämistä LCI-käytössä. Kehitetyn mallin avulla näiden laskenta on muiden laivakäytön oleellisten suureiden ohella mahdollista ja työn tavoitteet voidaan katsoa saavutetuiksi.

Luokituslaitokset asettavat laivan sähkökäyttöjärjestelmälle vaatimuksia, joiden toteuttaminen on tehokkainta aloittaa jo suunnittelun alkuvaiheessa. Esimerkiksi Det Norske Veritas edellyttää, ettei jännitteen särö pääkiskostossa normaalisti ylitä 10 %. Lloyd's:in mukaan yleinen raja on 8 %. Lisäksi Lloyd's edellyttää, ettei yksittäisten harmonisten yliaaltojen, joiden järjestysluku on yli 25, amplitudi ole suurempi kuin 1,5 %.[27]

Simulointimallin avulla tämäntyyppisten vaatimusten toteutuminen voidaan tarkistaa järjestelmätasolla jo hyvin aikaisessa vaiheessa, mikä helpottaa suunnittelua myöhemmin. Näin simulointimallia voidaan käyttää suunnittelun apuvälineenä tavanomaisten suunnittelumenetelmien rinnalla, mikä oli yhtenä työn tavoitteena.

Viitteet

- [1] Finney David. *Variable frequency AC motor drive systems*. Peter Peregrinus Ltd., London, 1988.
- [2] Neeser Gerd, Pfeiffer Gerd. High-performance converters for a.c. variable-speed drives in the megawatt range. *Energy & Automation*, Vol. 10, October 1988.
- [3] Luomi Jorma. *Sähkökoneiden muutosilmiöt*. Sähkömekaniikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu, 1990.
- [4] Niiranen Jouko. *Tahtimoottorin optimointi ja käytettävyyys sähkökäytöissä*. Sähkökäytön ja tehoelektroniikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 1992.
- [5] Moustafa E., Poloujadoff M. Experimental determination of machine characteristics for a double star armature synchronous machine. *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 8:103–112, 1983.
- [6] Mantere Juhani. *LCI- ja cyclo-potkurimoottoreiden vertailua*. ABB Industry Oy, sisäinen raportti, Helsinki, 1994.
- [7] Bühler Hansruedi. *Einführung in die Theorie geregelter Drehstromantriebe, Band 2: Anwendungen*. Birkhäuser Verlag, Basel, 1977.
- [8] Sato Noriaki, Semenov Vsevolod. Adjustable speed drive with a brushless dc motor. *IEEE Transactions on industry and general applications*, Vol. IGA-7, July 1971.
- [9] Vas Peter. *Vector control of AC machines*. Oxford University Press, New York, N.Y., USA, 1990.
- [10] Sudhoff S.D., Zivi E.L., Collins T. D. Start up performance of load commutated inverter fed synchronous machine drives. *IEEE Transactions on Energy conversion*, Vol. 10, June 1995.

- [11] Hu Lihua, Yakamini Robert. Harmonic transfer through converters and HVDC links. *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 7 No. 3, July 1992.
- [12] Niiranen Jouko. Vaihtosuuntaajalla syötetyn oikosulkumoottorikäytön analyysi taajuustasossa kierto-osoittimia käyttäen. *Ampeeri & Digitaali*, Vol. 7, heinäkuu 1991.
- [13] Colby R. S., Otto M. D., Boys J. T. Analysis of LCI synchronous motor drives with finite DC link inductance. *IEE Proceedings-b*, Vol. 140, November 1993.
- [14] Tunia Henryk, Kaźmierkowski Marian P. *Automatic Control of Converter-Fed Drives*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1994.
- [15] Koukkari Juha. Muutosilmiöiden laskenta laivan sähköverkossa. *Sähkömekaniikan erikoistyö*, 1994.
- [16] Mantooth Alan H., Fiegenbaum Mike. *Modeling with an analog hardware description language*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, 1995.
- [17] Analogy, Inc. *MAST Reference manual*. Julkaisematon, Beaverton, Oregon, USA, 1990.
- [18] Analogy, Inc. *Saber User's guide*. Julkaisematon, Beaverton, Oregon, USA, 1993.
- [19] Vlach Jiri, Singhal Kishore. *Computer methods for circuit analysis and design*. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, N.Y., USA, 1983.
- [20] Heikkilä Pauli. *Object-oriented approach to numerical circuit analysis*. Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 1992.
- [21] Analogy, Inc. *Advanced Saber Transient Analysis Control*. Julkaisematon, Beaverton, Oregon, USA, 1995.
- [22] Koskela Mikko. *Syklokonvertterikäytön numeerinen simulointi*. Teknillinen korkeakoulu, Sähkökäytön ja tehoelektroniikan laboratorio, Espoo, 1995.
- [23] Mård Matti. *Kierto-osoittimen käyttö sähkövoimatekniikassa, sähkökäytössä ja tehoelektroniikassa, Raportti 6*. Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan laboratorio, Espoo, 1981.
- [24] Mård Matti. *Sähkökäyttö, Luentomoniste*. Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 1994.
- [25] Per-Lennart Eriksson. *Keskustelut*. ABB Industry oy, 1995.

-
- [26] Kloss Albert. *A basic guide to power electronics*. John Wiley & Sons Ltd., New York, N.Y., USA, 1984.
- [27] Lehtonen Matti. *Harmonics in power systems of ships with electrical propulsion drives, Part 1*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 1996.

TKK SÄHKÖTEKNIKA
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

LIITE A. Diskreetin PID-säätimen MAST-kielinen ohjelmakoodi

```

element template pid_reg_vp act ref clk out u_fix =Kp,Ti,Td,fs,\
                                Int_lim,In, feedff_coeff, Tf, mgt

state i act

input i ref

state nu u_fix                # Back_emf correction

state nu out

state logic_4 clk

number Kp      = .5,
       Ti      = 1,
       Td      = 0,
       fs      = 1m,          # Sampling frequency
       Int_lim = 500,
       In,          # Nominal current
       feedff_coeff,
       Tf          = 5m,      # Time constant of filtering
       mgt          # Magnetizing time of the machine

{

val nu act_pu, ref_pu

state nu diff, diff_old, Pcoeff, Icoeff, Icoeff_old,\
Dcoeff, out_f, out_f_old, out_f_new,\
out_f_filt, Icoef1

state nu out_max,
out_min

number Ts,
f_f,
g_f

group{ref_pu,act_pu,Pcoeff,Icoeff,Dcoeff,

```

```
        out,out_f_new,u_fix} pidvar

parameters{

    Ts  = 1/ fs
    f_f = Tf/(Tf+Ts)
    g_f = Ts/(Tf+Ts)

}

values{

    act_pu = abs(act/In)
    ref_pu = abs(ref/In)

}

states{

    out_min = -1
    out_max = 1

}

when( time_init | dc_init ){

    Icoeff_old = 0
    diff_old    = 0
    schedule_event(time,out,0)

}

when(event_on(clk) & time >= mgt ){

    diff      = ref_pu - act_pu

    Pcoeff    = Kp * diff

    Icoef1    = (Icoeff_old + Ts/Ti*diff)

    if (Icoef1 > Int_lim) {

        Icoeff = Icoef1 - Ts/Ti*diff
    }
}
```

```
        Icoef1 = Icoeff
        Icoeff = Int_lim

    }

    else if (Icoef1 < -Int_lim) {

        Icoeff = Icoef1 - Ts/Ti*diff
        Icoef1 = Icoeff
        Icoeff = -Int_lim

    }

    else Icoeff = Icoef1

    Dcoeff      = Td * (diff - diff_old)/Ts

    Icoeff_old = Icoeff

    diff_old    = diff

# Limitation of the output

    out_f_old = out_f_new
    out_f_new = Pcoeff + Icoeff + Dcoeff + feedff_coeff*u_fix
    out_f_filt = f_f*out_f_old + g_f*out_f_new
    out_f = min(out_max,max(out_f_filt,out_min))
    schedule_event(time,out,out_f)

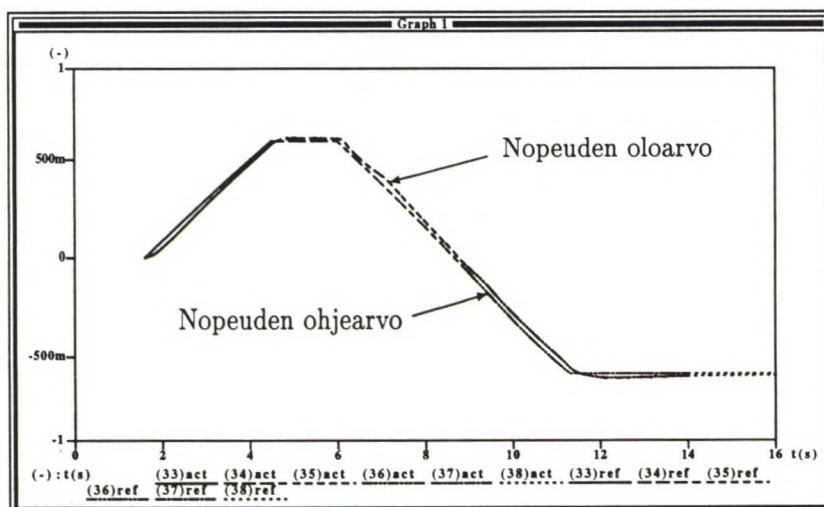
}

}
```


LIITE B. 1 MW käytön simulointituloksia suunnanvaihdossa

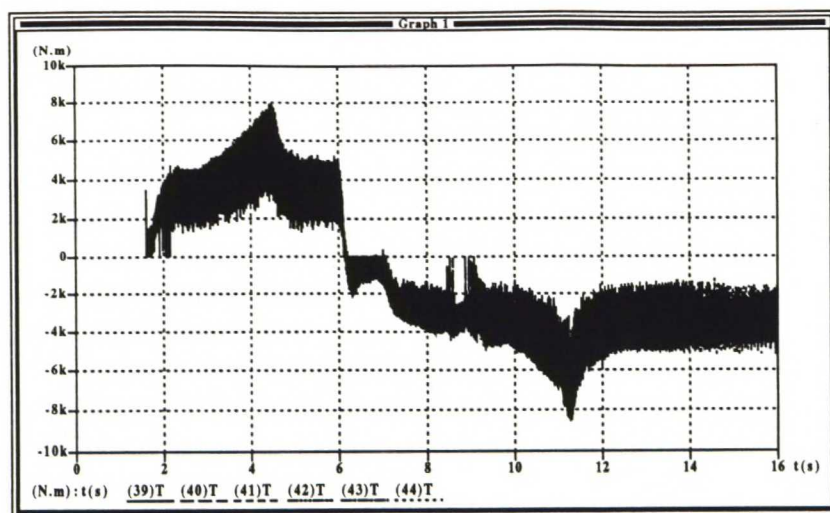
Tässä liitteessä esitetään kappaleen 5.1.1 mukaisen käytön eräitä simulointituloksia suunnanvaihdossa nopeudesta 0,6 p.u. nopeuteen $-0,6$ p.u. LCI-käytön suunnanvaihto toteutetaan jarruttamalla nopeus ensin nolleen ja vaihtamalla tämän jälkeen konesillan sytytysjärjestystä kappaleen 2.2.3 sivulla 34 olevan taulukon 2.2 mukaisesti. Suunnanvaihdon ongelmana on epätasainen vääntömomentti nolleenopeuden ympäristössä samalla tavalla kuin käynnistyksessäkin.

Kuvassa B.1 on esitetty käytön pyörimisnopeuden ohje- ja oloarvojen kuvaajat suhteellisarvoina suunnanvaihdossa. Oloarvo seuraa melko hyvin ohjetta ja suunnanvaihto onnistuu. Hidastusvaiheessa oloarvo seuraa ohjetta aluksi hy-



Kuva B.1. Arandan simuloidut nopeuden olo- ja ohjearvo suunnanvaihdossa

vin, mutta sitten erosuure alkaa kasvaa. Jarruttavan vastamomentin takia välipiirivirta on hyvin pieni ja se aukottuu, jolloin kuvassa B.2 esitetty ilmavälimomenttikin on pieni. Ajanhetkestä $t = 7,0$ s alkaen vastamomentin vaikutus on pienentynyt niin paljon, että käytöltä vaadittava momentti edellyttää jatkuvaa välipiirivirtaa. Tällöin sähköisen momentin itseisarvo kasvaa jyrkästi ja nopeuden oloarvo alkaa lähestyä ohjetta. Jarrutusvaiheessa ajanhetkellä n. 6,1 s nopeus on edelleen positiivinen, mutta kuvassa B.2 esitetty ilmavälimomentti vaihtaa merkkiä. Käyttö siirtyy siis generaattorialueelle ja alkaa syöttää tehoa verkkoon. Käyttö toimii generaattorialueella, kunnes se hetkellä $t = 8,75$ s pysähtyy. Tämän jälkeen pyörimissuunta vaihtuu negatiiviseksi ja käyttö alkaa toimia jälleen moottorialueella kiihtyen nopeuteen $-0,6$ p.u.



Kuva B.2. Arandan simuloitu ilmapälimomentti suunnanvaihdoissa

Momentin käyrämuodon kaikki yksityiskohdat eivät näy selvästi kuvassa B.2, koska laskentapisteidien lukumäärä on hyvin suuri kuvan resoluutioon verrattuna. Muutamia havaintoja voidaan kuitenkin tehdä. Alussa moottoria kiihdytettäessä momentti käy pulssimaisen virran alueella nollassa johtavan tyristoriparin muuttuessa samalla tavalla kuin kappaleessa 5.1.3 moottoria käynnistettäessä. Luonnollisesti myös itse suunnanvaihdon aikana nopeuden ollessa lähellä nollaa käyttö toimii pulssimaisen virran alueella ja momentin hetkellisarvo käy välillä nollassa.

Momentin aaltoisuus on koko suunnanvaihdon ajan varsin suuri. Varsinkin nollanopeuden ympäristössä molempien siltojen sytytyskulmat ovat lähellä 90 astetta, jolloin momentin aaltoisuus on kappaleen 2.2.4 sivulla 36 olevan kuvan 2.15 mukaisesti suuri. Kappaleessa 2.2.4 momentin aaltoisuutta tarkasteltiin tilanteessa, jossa välipiirivirta on vakio. Suunnanvaihdoissa näin ei kuitenkaan ole, koska välipiirivirta määräytyy moottorin momenttitarpeen mukaan. Esimerkiksi käytön toimiessa generaattorialueella vastamomentti on samansuuntainen moottorin sähköisen vääntömomentin kanssa, joten vaadittava välipiirivirta on pienempi kuin kiihdytyksessä, jossa momentit ovat erisuuntaiset. Tässä on kuitenkin jälleen muistettava, että simulointimallissa potkuri on mallinnettu neliöllisen vastamomentin avulla eikä todellisen potkurin mukaan. Todellisessa käytössä jarrutuksen aikana vaadittava virta on korkeampi, koska vesi ei silloin jarruta potkuria, vaan laivan liikkeestä johtuva veden virtaus potkurin suhteen pyrkii pyörittämään potkuria.